U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM PAINEL DE FACHADA

ARMANDO MIGUEL CUNHA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professora Doutora Maria Helena Corvacho

JUNHO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012*.

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

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

A meus Pais e meus Avós

Do not go where the path may lead; go instead where there is no path and leave a trail.

Ralph Waldo Emerson

AGRADECIMENTOS

Deseja o autor expressar os seus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que de algum modo contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

- Ao meu avô, Engenheiro Carlos Manuel Alves Pires, de cuja memória retirei forças nos momentos de maior desânimo;

- Aos meus pais e familiares chegados por todas as palavras de apoio e incentivo;

- Aos meus amigos que apesar da minha ausência ao longo destes meses sei que continuam a meu lado e me desejam o maior sucesso;

- À Professora Doutora Maria Helena Corvacho pela enorme paciência, disponibilidade e valiosos ensinamentos transmitidos através das respostas às minhas muitas perguntas. Queria agradecer especialmente, os constantes desafios lançados e novas ideias resultantes das muitas discussões ao longo da elaboração deste trabalho que foram sem dúvida uma grande fonte de motivação e entusiasmo para mim;

- Ao engenheiro Piet Standaert, diretor da Physibel, por toda a disponibilidade e informação prestada às minhas questões relativas ao programa de cálculo CAPSOL;

RESUMO

No presente trabalho é feito um estudo do comportamento térmico de um painel de fachada de conceção modular.

Este módulo destina-se a operações de reabilitação de fachadas sendo o seu principal objetivo o de aumentar o isolamento do edifício efetuando simultaneamente o pré-aquecimento do ar de ventilação durante o inverno.

O comportamento do módulo de fachada é estudado através da realização de simulações no programa de cálculo térmico CAPSOL.

Os resultados obtidos confirmam que este sistema se trata de uma solução interessante do ponto de vista da reabilitação de edifícios existentes trazendo consigo um conjunto de mais-valias a nível de desempenho térmico e poupança energética.

PALAVRAS-CHAVE: Fachada modular, pré-aquecimento, renovação do ar, reabilitação, simulação experimental

ABSTRACT

The subject of this work consists in the study of the thermal behaviour of a prefabricated and factory assembled façade modules.

This module is designed to be used in retrofit operations for existing buildings being its main objetive the increasing of the isolation of the building envelope as well as being able to preheat the ventilation air during winter conditions.

The thermal behaviour of the module is simulated through the use of the computer program CAPSOL.

The obtained results confirm that this system possesses interesting properties regarding retrofit operations enabling improvements of the thermal and energy use performance of existing buildings.

KEYWORDS: Modular facade, preheating, air renovation, retrofit, experimental simulation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT v

1 . INTRODUÇÃO 1
1.1. ENQUADRAMENTO 1
1.2. OBJETIVOS 1
1.3. METODOLOGIA 2
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO 2
2 . ENQUADRAMENTO 3
2.1. EVOLUÇÃO DAS PAREDES DE FACHADA EM PORTUGAL 3
2.2. O MERCADO DA REABILITAÇÃO EM PORTUGAL 4
2.2.1. INTRODUÇÃO 4
2.2.2. DESCRIÇÃO DO EDIFICADO E DO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL PORTUGUÊS 4
2.2.3. A IMPORTÂNCIA DA REABILITAÇÃO 7
2.3. SOLUÇÕES TRADICIONAIS NA REABILITAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS 10
2.3.1. ISOLAMENTO TÉRMICO NA CAIXA DE AR 10
2.3.2. ISOLAMENTO PELO INTERIOR 10
2.3.3. ISOLAMENTO TÉRMICO PELO EXTERIOR 11
2.4. PRÉ-FABRICAÇÃO 12
2.4.1. INTRODUÇÃO 12
2.4.2. AS VANTAGENS E DESVANTAGENS DA PRÉ-FABRICAÇÃO NA INDUSTRIA DA CONSTRUÇÃO 12
2.4.3. CONCEITO DE SISTEMA CONSTRUTIVO 13
2.4.4. CONCEITOS SOBRE PRÉ-FABRICAÇÃO 14
2.5. O ANNEX 50 16
2.5.1. ÂMBITO E OBJETIVOS 16
2.5.2. CONCEITO DO SISTEMA DE PRÉ-FABRICAÇÃO 17
2.5.2.1. Módulo Suíço 20
2.5.2.2. Módulo Austríaco 21

2.5.2.3. Módulo Francês 24
2.5.2.4. Módulo Português 26
3 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS 29
3.1. CAPSOL 29
3.1.1. O QUE É O CAPSOL 29
3.1.2. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO CAPSOL 29
3.1.3. PARÂMETROS DE CÁLCULO 31
3.1.4. IMPORTAÇÃO DOS DADOS CLIMÁTICOS DO SOLTERM 32
3.1.5. PARÂMETROS DA ZONA SOLAR 34
3.1.6. DEFINIÇÃO DE ZONAS 35
3.1.7. DEFINIÇÃO DE LIMITES OU *WALLS* 36
3.1.7.1. Características do Revestimento 36
3.1.7.2. Características do elemento interior do Módulo 37
3.1.8. ELEMENTOS DELIMITATIVOS DAS ZONAS 38
3.1.9. CONTROLOS 39
3.1.9.1. Controlo de Ventilação 40
3.1.10. MODELO DE VENTILAÇÃO EM EXCEL 42
3.1.10.1. Alterações efetuadas no modelo de ventilação em Excel 44
3.1.11. RELATÓRIO ALFANUMÉRICO CAPSOL 46
4 - BASE DE DADOS ACCESS 47
4.1. DESCRIÇÃO 47
4.2. ZONA CLIMÁTICA 48
4.3. PAREDE DE SUPORTE 48
4.4. REVESTIMENTO 49
4.5. ISOLAMENTO 49
4.6. MODELO DO MÓDULO 50
4.7. SIMULAÇÕES 50
4.8. FOLHA DE CÁLCULO EXCEL 51
5 - ESTUDO DE SENSIBILIDADE 53
5.1. INTRODUÇÃO 53
5.2. MATERIAL DE PLACAGEM 54
5.2.1. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO 54
5.2.2. ANÁLISE 55

5.2.3. CONCLUSÃO 61
5.3. COR DA PLACAGEM 63
5.3.1. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO 63
5.3.2. ANÁLISE 64
5.3.3. CONCLUSÃO 66
5.4. ESPESSURA DO ISOLAMENTO 67
5.4.1. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO 67
5.4.2. ANÁLISE 67
5.4.3. CONCLUSÃO 70
5.5. ESPESSURA DA CAIXA DE AR 72
5.5.1. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO 72
5.5.2. CONCLUSÃO 75
5.6. EMISSIVIDADE DOS MATERIAIS DA CAIXA DE AR 77
5.6.1. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO 77
5.6.2. ANÁLISE 78
5.6.3. CONCLUSÃO 80
6 – SIMULAÇÃO DE MEDIDAS DE REABILITAÇÃO NUMA HABITAÇÃO 81
6.1. INTRODUÇÃO 81
6.2. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO 81
6.2.1. DADOS CLIMÁTICOS 81
6.2.2. PERÍODO DE SIMULAÇÃO 82
6.2.3. DESCRIÇÃO DA DIVISÃO E COMPONENTES SIMULADOS 82
6.2.4. SISTEMAS DE CONTROLO DE TEMPERATURA E MEDIÇÃO DE ENERGIA NECESSÁRIA 83
6.2.5. REGISTOS EFETUADOS 84
6.2.6. TIPOLOGIAS DE FACHADA SIMULADAS 84
6.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS 85
6.3.1. PERÍODO DE AQUECIMENTO 85
6.3.2. PERÍODO DE ARREFECIMENTO 90
7. CONCLUSÃO 93
7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS 93
7.1 POSSIBILIDADES DE DESENVOLVIMENTO FUTURO 94

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Evolução das paredes exteriores em Portugal(SOUSA, 1996) 4
Fig. 2.2 - Programas de realojamento (MINISTÉRIO DAS OBRAS PUBLICAS TRANSPORTE E HABITAÇÃO, 2004) 5
Fig. 2.3 - Data de construção dos diferentes edifícios do edificado Português (SOUSA, 2010) citado de (INE, 2001) 5
Fig. 2.4 - Output total de cada setor da indústria de Construção de 2006 a 2012 (EUROCONSTRUCT, 2009) 6
Fig. 2.5 - Apoio do governo ao arrendamento e aquisição(MINISTÉRIO DAS OBRAS PUBLICAS TRANSPORTE E HABITAÇÃO, 2004) 7
Fig. 2.6 - Estado de conservação dos alojamentos em Portugal em 2001 7
Fig. 2.7 - Investimentos na construção na Europa em 2000(FEPICOP, 2010) 8
Fig. 2.8 - Isolamento pelo interior(HENRIQUE, 2007) 10
Fig. 2.9 - ETICS revestimento espesso(HENRIQUE, 2007) 11
Fig. 2.10 - ETICS revestimento delgado(HENRIQUE, 2007) 11
Fig. 2.11 - Fachada ventilada(HENRIQUE, 2007) 12
Fig. 2.12 - Exemplo de pré-fabricação pesada, passagem inferior 14
Fig. 2.13 - Exemplo de pré-fabricação leve, piso técnico(CYPE, consultado em 20/01/2012) 15
Fig. 2.14 - Exemplo de pré-fabricação ligeira - Caixa de estore 15
Fig. 2.15 - Solução totalmente pré-fabricada(IEA ECBCS, 2010) 17
Fig. 2.16 - Solução parcialmente pré-fabricada(IEA ECBCS, 2010) 18
Fig. 2.17 - Categorias de módulos(IEA ECBCS, 2010) 19
Fig. 2.18 - Variações de design de módulos dentro do mesmo tipo 19
Fig. 2.19 - Protótipo módulo Suíço 20
Fig. 2.20 - Pormenor de integração de condutas no interior do módulo 20
Fig. 2.21 - Corte transversal do módulo 20
Fig. 2.22 - Subestrutura de madeira onde serão montados os módulos 21
Fig. 2.23 - Módulo básico 21
Fig. 2.24 - Montagem do módulo de maiores dimensões em fábrica 22
Fig. 2.25 - Detalhe da estrutura em favo de mel e a sua aplicação no módulo 23
Fig. 2.26 - Princípio de funcionamento do elemento solar 23
Fig. 2.27 - Fachada com módulos com coletores solares embutidos (a escuro) juntamente com os módulos básicos (a cinzento) 23
Fig. 2.28 - Montagem do módulo em fábrica 24
Fig. 2.29 - O acabamento do módulo é realizado em obra, neste caso uma fachada ventilada 25
Fig. 2.30 - Esquema dos módulos RECOLCI 25
Fig. 2.31 - Esquema da estrutura de fachada formada pelos módulos e do sistema de ventilação (a azul) 25
Fig. 2.32 - Corte esquemático do módulo 26
Fig. 2.33 - Sistema de encaixe dos módulos e pormenor do isolamento 26
Fig. 2.34 - Espaço para alojamento de condutas no módulo 27
Fig. 2.35 - Montagem do módulo em fábrica 27
Fig. 2.36 - Modulo acabado e instalado 27
Fig. 2.37 - Esquema do módulo estudado 28
Fig. 2.38 - Esquema de simulação do módulo 28

Fig. 3.1 - Esquema básico CAPSOL, transmissão de calor entre zonas por condução, convecção e radiação-infravermelha 29
Fig. 3.2 – Esquema básico CAPSOL, condução, convecção, radiação infravermelha e solar 30
Fig. 3.3 - Parâmetros de cálculo do CAPSOL 31
Fig. 3.4 - Folha de dados climáticos do Solterm para o Porto 32
Fig. 3.5 - Folha de dados climáticos do CAPSOL da temperatura para o Porto, função FTE 33
Fig. 3.6 - Funções FTE, FSG e FSD usadas pelo CAPSOL obtidas através dos dados do Solterm para o Porto 33
Fig. 3.7 - Parâmetros da zona solar 34
Fig. 3.8 - Zonas definidas no CAPSOL 35
Fig. 3.9 - Esquema da simulação no CAPSOL 36
Fig. 3.10 - Exemplo de placagem do módulo 36
Fig. 3.11 - Exemplo do conjunto “parede de suporte+isolamento do módulo” 38
Fig. 3.12 - Formulário do CAPSOL para definição da separação entre zonas 38
Fig. 3.13 - Definição de controlos no CAPSOL 39
Fig. 3.14 - Função T02, temperatura alvo (Target θ) 40
Fig. 3.15 - Esquema usado no modelo de ventilação 42
Fig. 3.16 - Modelo de ventilação em Excel 43
Fig. 3.17 - Folha de cálculo original modelo ventilação em Excel 44
Fig. 3.18 - Folha de cálculo modificada modelo ventilação em Excel 45
Fig. 3.19 - Definição dos outputs a registar no relatório do CAPSOL 46
Fig. 4.1 - Formulário zona climática 48
Fig. 4.2 - Formulário Parede de suporte 48
Fig. 4.3 - Formulário do revestimento do módulo 49
Fig. 4.4 - Formulário Isolamento 49
Fig. 4.5 - Formulário modelo de módulo 50
Fig. 4.6 - Formulário Simulação 50
Fig. 4.7 - Folha de cálculo Excel elaborada pelo autor 52
Fig. 5.1 - Fluxo de calor por condução, convecção e radiação durante o período de aquecimento, 9-18h 55
Fig. 5.2 - Fluxo de calor por condução, convecção e radiação durante o período arrefecimento, 9-18h 55
Fig. 5.3 - Diferença de temperatura média em relação ao clima exterior durante o período de aquecimento, 9-18h 56
Fig. 5.4 – Temperaturas médias durante o período de aquecimento no intervalo 9-18h em vários pontos dos módulos, módulos apresentados por decrescente temperatura na caixa de ar. 57
Fig. 5.5 - Diferença de temperatura média na caixa de ar em relação ao clima exterior durante o período de arrefecimento, 9-18h 58
Fig. 5.6 - Caudal médio na caixa de ar, período de arrefecimento 9-18h 58
Fig. 5.7 - Fluxo de calor por condução pela parede original sem módulo durante o período de arrefecimento, 9-18h 59
Fig. 5.8 - Temperaturas em vários pontos da parede de suporte original, simulação sem a presença de módulo durante o período de arrefecimento, 9-18h 60
Fig. 5.9 - Temperaturas médias durante o período de arrefecimento no intervalo 9-18h em vários pontos dos módulos, módulos apresentados por decrescente temperatura na caixa de ar. 60
Fig. 5.10 - Perdas térmicas totais através do módulo durante o período de aquecimento 62
Fig. 5.11 - Perdas térmicas totais por ventilação durante o período de aquecimento ($Q=30m^3/h$) 62

Fig. 5.12 - Ganhos térmicos totais pela envolvente durante o período de arrefecimento, 9-18h 62
Fig. 5.13 - Coeficiente de absorção da radiação solar da superfície exterior da placagem 63
Fig. 5.14 - Fluxo de calor por condução, convecção e radiação durante o período aquecimento, 9-18h 64
Fig. 5.15 Fluxo de calor por condução, convecção e radiação durante o período de arrefecimento, 9-18h 64
Fig. 5.16 - Diferença de temperatura em relação ao clima exterior durante o período de aquecimento 9-18h 65
Fig. 5.17 - Diferença de temperatura em relação ao clima exterior durante o período de arrefecimento, 9-18h 65
Fig. 5.18 - Perdas térmicas totais através do módulo durante o período de aquecimento 66
Fig. 5.19 - Perdas térmicas totais por ventilação durante o período de aquecimento (Q=30m^3/h) 66
Fig. 5.20 - Ganhos térmicos totais através do módulo durante o período de arrefecimento, 9-18h 66
Fig. 5.21 - Fluxo de calor por condução, período de aquecimento 9:00h. 67
Fig. 5.22 - Fluxo de calor por condução, período de aquecimento 13:00h. 68
Fig. 5.23 - Temperaturas em vários pontos dos módulos, módulos apresentados por decrescente temperatura média na caixa de ar, período de arrefecimento 13h 68
Fig. 5.24 - Fluxo de calor por condução, período de aquecimento 0-24 horas 69
Fig. 5.25 - Diferença de temperatura em relação ao clima exterior ,período de aquecimento 0-24h .. 69
Fig. 5.26 - Fluxo de calor por condução médio, periodo de arrefecimento 9-18h 70
Fig. 5.27 - Perdas térmicas totais através do módulo durante o período de aquecimento 70
Fig. 5.28 - Perdas térmicas totais por ventilação durante o período de aquecimento (Q=30m^3/h) 70
Fig. 5.29 - Ganhos térmicos totais através do módulo durante o período de arrefecimento, 9-18h 70
Fig. 5.30 - Fluxo de calor por condução, período de aquecimento 9-18h 73
Fig. 5.31 - Fluxo de calor por convecção, período de aquecimento 9-18h 73
Fig. 5.32 - Diferença de temperatura em relação ao exterior, período de aquecimento 9-18h 73
Fig. 5.33 - Fluxo de calor por condução, período de arrefecimento 9-18h 73
Fig. 5.34 - Fluxo de calor por convecção, período de arrefecimento 9-18h 73
Fig. 5.35 - Caudal médio na caixa de ar, período de arrefecimento 9-18h 74
Fig. 5.36 - Ganhos de temperatura em relação ao exterior, período de arrefecimento 9-18h 74
Fig. 5.37 - Temperaturas em vários pontos dos módulos, módulos apresentados por decrescente temperatura média na caixa de ar , período de arrefecimento 9-18h 75
Fig. 5.38 - Perdas térmicas totais através do módulo durante o período de aquecimento 75
Fig. 5.39 - Perdas térmicas totais por ventilação durante o período de aquecimento (Q=30m^3/h) 75
Fig. 5.40 - Ganhos térmicos totais através do módulo durante o período de arrefecimento, 9-18h 75
Fig. 5.41 - Fluxo de calor por condução, convecção e radiação, período de aquecimento 9-18h 78
Fig. 5.42 - Fluxo de calor por condução, convecção e radiação, período de arrefecimento 9-18h 78
Fig. 5.43 - diferença de temperatura em relação ao exterior, período de aquecimento 9-18h 79
Fig. 5.44 - diferença de temperatura em relação ao exterior, período de arrefecimento 9-18h 79
Fig. 5.45 - Perdas térmicas totais através do módulo durante o período de aquecimento 80
Fig. 5.46 - Perdas térmicas totais por ventilação durante o período de aquecimento (Q=30m^3/h) 80
Fig. 5.47 - Ganhos térmicos totais através do módulo durante o período de arrefecimento, 9-18h 80
Fig. 6.1 – Necessidades de aquecimento 86
Fig. 6.2 - Necessidades de aquecimento, comparação com ETICS 87
Fig. 6.3 - Melhoria do desempenho do módulo devido ao pré-aquecimento do ar (% da melhoria global) 88
Fig. 6.4 - Diminuição das necessidades de aquecimento devido ao pré-aquecimento do ar 89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1 - Condições de simulação, material de placagem 54
Tabela 5.2 - Condições de simulação para cor da placagem 63
Tabela 5.3 - Condições de simulação, espessura do isolamento 67
Tabela 5.4 - Condições de simulação, espessura da caixa de ar 72
Tabela 5.5 - Condições de simulação, emissividade dos materiais da caixa de ar 77
Tabela 6.1 - Áreas de referência dos componentes da divisão 82
Tabela 6.2 - Características do envidraçado 82
Tabela 6.3 - Características térmicas dos componentes opacos da divisão 83
Tabela 6.4 – Necessidades de aquecimento [kWh] 85
Tabela 6.5 - Diminuição das necessidades de aquecimento devido ao pré-aquecimento do ar de ventilação [kWh] 88
Tabela 6.6 - Necessidades de arrefecimento [kWh] 90

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ECBCS – Programa para a Conservação de energia em Edifícios e Sistemas Comunitários

IEA – Agência Internacional de Energia

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

XPS – Espuma rígida poliestireno extrudido

c – calor específico [J/kgK]

K - coeficiente de transmissão térmica [W/m^{2o}K]

R – resistência térmica [m3K/W]

U - coeficiente de transmissão térmica [W/m2K]

λ - condutibilidade térmica [W/mK]

ρ - densidade [Kg/m3]

τ_s – coeficiente de transmissividade

ε_{ir} – emissividade

ρ_s – coeficiente de refletividade

α_s – coeficiente de absorção solar

sr - Coeficiente de receção solar [%];

Q_h – necessidades de aquecimento [kWh]

1. Introdução

1.1. ENQUADRAMENTO

Os edifícios existentes são responsáveis por grande parte do consumo energético dos países desenvolvidos.

Em Portugal cerca de metade dos edifícios foi construído durante as décadas de 60, 70e 80 altura em que o desempenho térmico e energético das habitações não constituía uma prioridade em termos de qualidade de construção.

Torna-se assim clara a necessidade de proceder à reabilitação destes edifícios de uma forma técnica, económica e ambientalmente acertada de forma a revitalizar o parque edificado.

Esta operação seria beneficiada pelo uso de técnicas modernas de construção que valorizem a qualidade e eficiência, a rapidez de execução, a estandardização bem como a sustentabilidade a longo prazo.

A pré-fabricação é a técnica que obedece a todos estes requisitos tratando-se de um método cada vez mais presente e em constante desenvolvimento na indústria da construção.

Este trabalho irá focar-se na reabilitação da fachada de edifícios onde a adoção de uma solução modular é aquela que melhor se adequa as necessidades descritas anteriormente.

As soluções de reabilitação tradicionais tendem a concentrar-se em sistemas singulares dos edifícios conduzindo a soluções não integradas e menos atraentes a nível económico.

O uso de painéis modulares de fachada irá permitir a integração de vários sistemas permitindo minimizar o consumo energético a nível de aquecimento, arrefecimento entre outros.

Para além disso, este método de reabilitação irá permitir uma estandardização de todas as operações efetuadas ao longo da construção, uma melhor garantia de qualidade, um processo de reabilitação rápido e com distúrbio mínimo dos moradores, representando no geral uma solução economicamente mais vantajosa.

1.2. OBJETIVOS

Procura-se perceber a influência de várias características de módulos pré-fabricados de painéis de fachada no comportamento térmico de um edifício.

1.3. METODOLOGIA

Usando o programa de simulação térmica CAPSOL procedeu-se à simulação e análise de vários tipos de módulos com diferentes características.

Selecionadas as características mais vantajosas simulou-se a aplicação dos módulos na fachada de um edifício estudando o seu impacto no comportamento térmico deste.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este estudo consiste na análise e simulação do comportamento térmico de um painel de fachada.

No capítulo 2 explica-se a pertinência do objeto de estudo deste trabalho bem como todos os benefícios que dele advêm. Será realizada a uma breve descrição dos sistemas de fachada existentes em Portugal bem como os conceitos principais da reabilitação de edifícios e o uso da pré-fabricação na indústria da construção.

O capítulo 3 descreve o programa de cálculo utilizado (CAPSOL) descrevendo as suas capacidade e funcionalidades bem como as simulações realizadas e decisões tomadas ao longo do processo de simulação.

No capítulo 4 procede-se à explicação da base de dados em Access associada a uma folha de cálculo Excel que permitiu o armazenamento e análise de todos os dados obtidos através do programa de cálculo CAPSOL.

A base de dados e folha de cálculo foram inteiramente desenvolvidas pelo autor de forma a facilitar a leitura e análise de resultados bem como possibilitar a terceiros o acesso à infirmação de uma forma organizada e de fácil compreensão.

No capítulo 5 são explicadas as diferentes características dos módulos que foram alvo de simulação procedendo-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos.

O capítulo 6 centra-se na simulação da aplicação dos módulos estudados numa habitação comparando o seu desempenho térmico face à situação original bem como com soluções mais tradicionais de reabilitação como a aplicação do sistema ETICS.

2. Enquadramento

2.1. Evolução das Paredes de Fachada em Portugal

O objeto em estudo neste relatório, módulos pré-fabricados de fachada, correspondem a uma solução principalmente pensada para casos de reabilitação urbana.

É assim interessante, antes de tudo, compreender quais as técnicas construtivas mais comuns para soluções de fachada em Portugal.

A partir da década de 40 o betão armado começou a ser o material mais utilizado na construção em Portugal. Numa primeira fase o betão era usado essencialmente em pavimentos sendo depois utilizado também nos elementos verticais de suporte.

Assim as paredes de fachada que até então tinham funções de suporte passaram a ter apenas como função a constituição de panos de enchimento.

Ligado a este fator houve também uma mudança nos materiais utilizados nas paredes sendo a pedra substituída pelo uso de tijolos cerâmicos, inicialmente elementos maciços mas evoluindo progressivamente para elementos de furação horizontal.

Na década de 60 o sistema de parede dupla de tijolo tornou-se a solução mais corrente na indústria de construção.

Este sistema apresentava diversas vantagens em relação ao sistema de parede simples usado até então como a redução da espessura dos panos diminuindo assim o peso a suportar pela estrutura bem como o aumento da produtividade e da economia de mão de obra.

No fim da década de 70 com a introdução da regulamentação térmica em Portugal aliado a uma crescente consciencialização da necessidade de poupança de energia começou o emprego de isolantes térmicos preenchendo a caixa de ar das paredes duplas.

No período atual o sistema de paredes duplas continua a ser o sistema construtivo mais comum na construção Portuguesa. São paredes simples duplas constituídas por tijolo cerâmico de elevada furação horizontal não ultrapassando geralmente pano mais espesso 0,15m de espessura.

A este tipo de sistema costumam estar ligadas patologias associadas à deficiente ligação entre os panos constituintes da parede dupla, a uma drenagem e ventilação da caixa de ar deficiente bem como uma má colocação do isolante.

Apesar de ser um sistema de uso frequente e plenamente difundido carece de acessórios e elementos para a resolução de pontos singulares das paredes potenciando assim em obra a ocorrência de situações de improviso que levam a uma deficiente qualidade construtiva.(SOUSA, 1996)

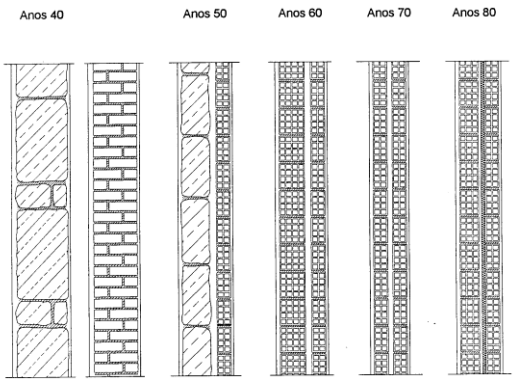


Fig. 2.1 – Evolução das paredes exteriores em Portugal(SOUSA, 1996)

2.2. O MERCADO DA REABILITAÇÃO EM PORTUGAL

2.2.1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção é um fator importante na economia de Portugal bem como de qualquer país.

De facto, a indústria de construção é um dos principais empregadores na União Europeia representando cerca de 10% do PIB europeu.

A adoção e utilização do sistema de reabilitação em estudo depende das suas vantagens técnicas mas também, principalmente, das suas vantagens económicas.

Mesmo que uma solução de reabilitação de fachada seja excelente a nível técnico e traga grandes benefícios ao edifício onde é aplicada, essa solução não será amplamente adotada se não possuir uma vantagem económica face às soluções usadas correntemente.

Além disso, tratando-se de uma solução principalmente vocacionada para a reabilitação de edifícios existentes, apesar de não estar limitada a tal, é também importante discutir as vantagens e desvantagens do foco em obras de reabilitação em detrimento de nova construção.

2.2.2. DESCRIÇÃO DO EDIFICADO E DO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL PORTUGUÊS

Desde de 1998 e durante toda a década seguinte verificou-se um forte crescimento na concessão de crédito por parte dos bancos especialmente para o setor da habitação.

Milhares de famílias compraram casa com recurso ao crédito. Estimativas do Banco de Portugal apontam para um total de dívida em relação ao crédito para habitação de 114 mil milhões de € dos quais 1,7% já se encontram em incumprimento, valor este que se espera que venha a subir nos próximos anos.

Durante este tempo o Governo promoveu também o acesso de famílias desfavorecidas a casa própria através do programa de Realojamento de famílias com necessidades habitacionais assegurando um apoio a fundo perdido às Câmaras municipais e instituições financeiras de 40 a 50% do valor total do investimento efetuado. De facto, ao abrigo deste programa o apoio do estado aumentou de 26 milhões de euros em 1992 para 87 milhões de euros em 2002.

No entanto, a construção em massa de habitação derivada deste programa não se revelou adequada na resolução dos problemas sociais das comunidades a que este se destinava.

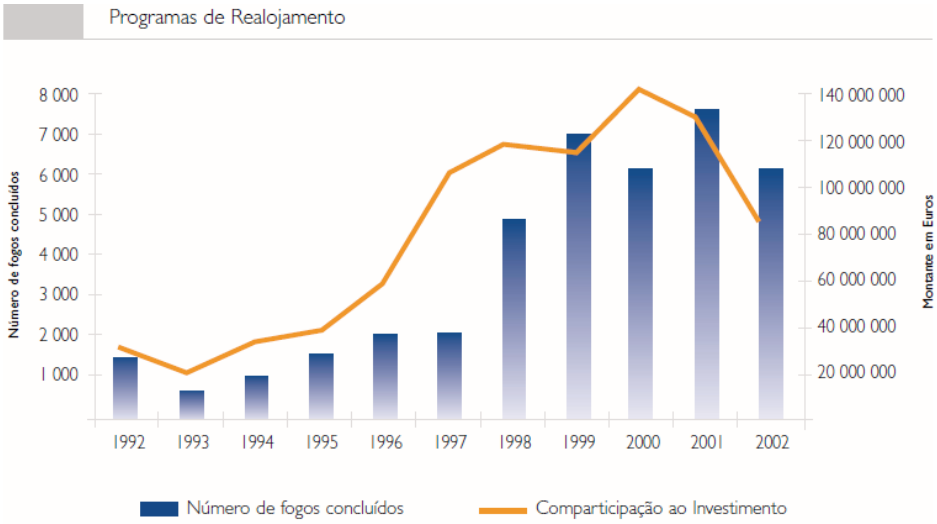


Fig. 2.2 - Programas de realojamento (MINISTÉRIO DAS OBRAS PUBLICAS TRANSPORTE E HABITAÇÃO, 2004)

Toda esta procura teve também reflexo na indústria da construção portuguesa que prontamente respondeu a esta necessidade aumentando em muito os pedidos de licenças para nova habitação.

Durante a segunda metade da década de 90 a média de pedidos anuais para novas licenças de habitação ascendia a 96 mil por ano.(EUROCONSTRUCT, 2009)

É assim fácil de perceber porque em 2004 Portugal tinha um dos parques habitacionais mais jovens da Europa, 67% das habitações existentes foram construídas após 1971.(INE, 2001)

No entanto todas estas obras não foram muitas vezes alvo do acompanhamento e fiscalização adequadas não garantindo assim a durabilidade e qualidade do património edificado.

Apesar do grande volume de edifícios construído nos últimos anos, o parque edificado português encontra-se envelhecido, os edifícios construídos nas décadas de 60,70 e 80 representam mesmo assim 50,56% do número total de edifícios do parque edificado português.

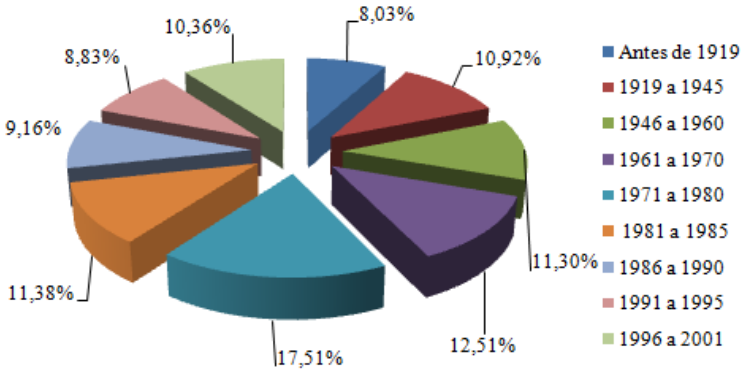


Fig. 2.3 - Data de construção dos diferentes edifícios do edificado Português (SOUSA, 2010) citado de (INE, 2001)

No entanto, este *boom* construtivo sofreu uma diminuição significativa especialmente a partir de 2008 quando se instalou o início da recessão económica.

A construção de edifícios residenciais caiu 30% em 2009 em relação a períodos homólogos.(EUROCONSTRUCT, 2009)

O grande nível de endividamento das famílias bem como as restrições de acesso ao crédito pelos bancos foram os grandes contribuidores para esse facto.

Os bancos que até então tinham sido um dos grandes impulsionadores da indústria da construção inverteram a sua tendência de concessão de crédito fácil às famílias e passaram a exigir juros mais elevados para a concessão de novos créditos.

À falta de boas perspetivas este deverá ser uma tendência que se continuará a verificar nos próximos anos.

A produção das empresas de construção civil foi em 2010 apenas 48% da verificada em 2001 e o número de novos fogos teve uma quebra de 41% face a 2008.(FEPICOP, 2010)

Dados de 2009 revelam que entre 165000 e 200000 novos fogos ainda estavam para venda, ou seja 30% dos novos fogos. Enquanto este excesso de habitação não for vendido é duvidoso o relançamento do setor.(EUROCONSTRUCT, 2009)

Em 2003, do total de habitações nacionais, 544 mil (11%) encontram-se vagas destas 105 mil estão disponíveis para venda,80 mil para arrendamento e 28 mil destinam-se à demolição.

Por outro lado, 29 mil famílias vivem em alojamentos precários.(MINISTÉRIO DAS OBRAS PUBLICAS TRANSPORTE E HABITAÇÃO, 2004)

Estes números revelam uma desregulação do setor bem como uma má adequação à realidade revelando a não existência de um plano sustentável e apropriado às necessidades do país e da sua população.

Já o setor de construção pública apresentou desde de 2009 a 2011 um grande aumento do número e valor dos contractos devido ao programa de renovação do parque escolar promovido pelo Governo. No entanto, esse dinamismo não foi acompanhado pelo setor privado.

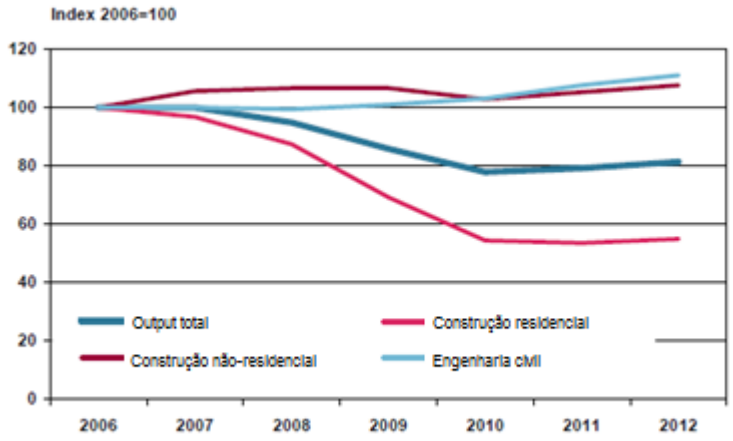


Fig. 2.4 - Output total de cada setor da indústria de Construção de 2006 a 2012 (EUROCONSTRUCT, 2009)

De facto, as licenças para a construção de edifícios não residências privados representaram menos 30,6% em 2008 em relação a período homólogo.(EUROCONSTRUCT, 2009)

Este facto deve-se a crescente desconfiança dos investidores em relação a este setor bem como o adiamento de obras até se atingir uma situação económica mais favorável.

Como é visível na figura Fig. 2.4 o setor de engenharia civil e obras publicas sofreu um aumento principalmente no ano de 2009. Isto deve-se à realização de eleições locais e Europeias o que

promoveu o início de novos contractos que foram finalizados num espaço de tempo relativamente curto.

Relativamente ao mercado de arrendamento, desde 1992 a 1997 que o apoio do governo ao arrendamento vinha crescendo em relação à opção de aquisição de casa própria.

No entanto, esta tendência inverte-se a partir de 1997 alargando-se em 2002 onde 81% do apoio do Estado era destinado à aquisição nova e apenas 19% ao arrendamento. Esta tendência manteve-se nos anos seguintes.

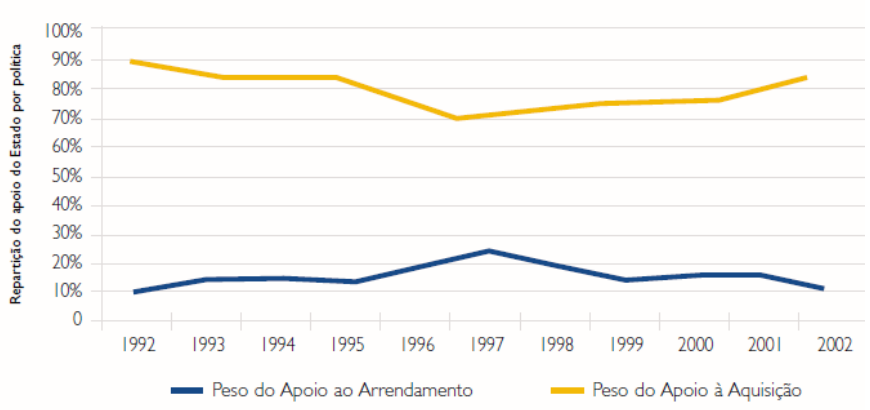


Fig. 2.5 - Apoio do governo ao arrendamento e aquisição(MINISTÉRIO DAS OBRAS PUBLICAS TRANSPORTE E HABITAÇÃO, 2004)

Esta falta de apoio ao mercado de arrendamento revela o desinteresse do Governo em apostar neste setor.

Esta atitude não é sustentável não podendo continuar inalterada no futuro.

De facto, a reocupação dos edifícios menos recentes, especialmente nos centros das cidades reveste-se de inúmeros benefícios económicos, sociais, de qualidade de vida, entre outros como será discutido de seguida.

2.2.3. A IMPORTÂNCIA DA REABILITAÇÃO

Segundo os Censos 2001 dos 5,7 milhões de fogos existentes em Portugal cerca de 1 milhão precisa de intervenção e cerca de 15% (800 mil) do total de alojamentos necessitam de obras profundas de reabilitação sendo que 6% (325 mil) se encontravam degradados ou muito degradados.

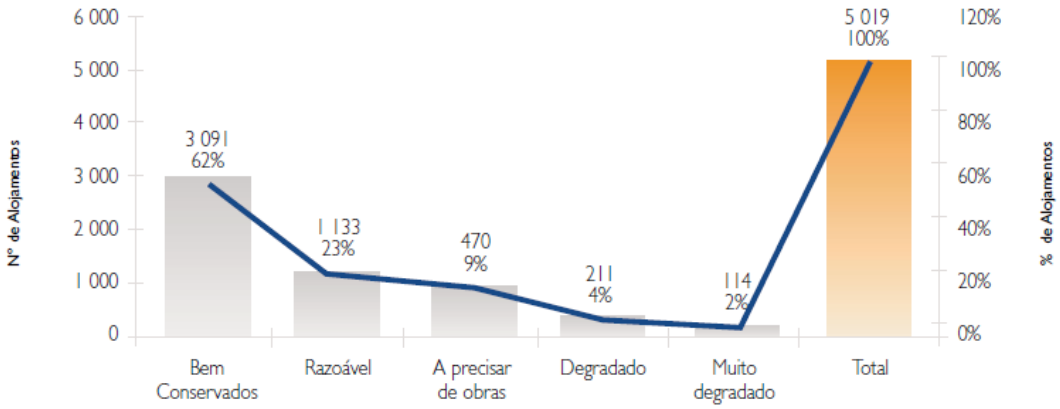


Fig. 2.6 - Estado de conservação dos alojamentos em Portugal em 2001

Dos 800 mil alojamentos a necessitar de obras 510 mil (65%) são de residência habitual, 180 mil (22%) encontram-se vagos e 110 mil (14%) são de uso sazonal.

Dos alojamentos a necessitar de obras 36% localizam-se nas áreas metropolitanas de Lisboa e Porto.(MINISTÉRIO DAS OBRAS PUBLICAS TRANSPORTE E HABITAÇÃO, 2004)

O congelamento das rendas anteriores a 1990 e a consequente debilidade financeira dos respetivos proprietários foi o fator que mais contribuiu para degradação do parque habitacional.

Cerca de 325 mil alojamentos, principalmente devido à sua idade, carecem de pelo menos uma de quatro infraestruturas básicas, eletricidade, água canalizada, instalações elétricas e instalações de banho.

Destes alojamentos, 70% localizam-se em edifícios anteriores a 1960 existido 115 mil alojamentos integrados em edifícios muito degradados.(MINISTÉRIO DAS OBRAS PUBLICAS TRANSPORTE E HABITAÇÃO, 2004)

Esta situação deve-se não só a fatores económicos, culturais e educacionais mas também à falta de investimento na área da reabilitação e manutenção por parte da indústria da construção em Portugal.

De forma a combater este problema o governo criou uma série de programas com o intuito de incentivar a área da reabilitação urbana, programas como: Rehabita, Recria, Reciph e Solarh mas os resultados ficaram aquém do esperado.

Em outubro de 2009 foi aprovado o Decreto-Lei nº307/2009(DIÁRIO DA REPÚBLICA, 2009) que em conjunto com medidas aprovadas no orçamento de estado do mesmo ano tem como objetivo estimular a reabilitação urbana a médio prazo.

É necessário lembrar no entanto que incentivos do estado bem como uma maior facilidade de acesso ao crédito não chegam para lançar o setor da reabilitação, é necessário também uma mudança em relação à cultura de reabilitação e manutenção de propriedades que neste momento se apresenta como muito pouco significativa.

Em Portugal o setor da reabilitação representa 6,5% do total do setor da construção ao passo que em Espanha este setor representa 26% da indústria e a média Europeia situa-se nos 36%.(FEPICOP, 2010)

País	Habitação	Reabilitação	Não Residencial	Engenharia Civil
Aústria	23,98%	32,14%	19,90%	23,98%
Bélgica	26,72%	31,47%	25,00%	16,81%
Dinamarca	12,94%	36,47%	20,59%	30,00%
Finlândia	19,70%	31,82%	28,79%	19,70%
França	21,97%	41,16%	17,68%	19,19%
Alemanha	27,99%	37,36%	18,86%	15,79%
Irlanda	34,01%	21,77%	24,49%	19,73%
Itália	17,23%	46,30%	15,06%	21,42%
Holanda	19,44%	37,96%	17,59%	25,00%
Noruega	17,93%	38,62%	22,07%	21,38%
Espanha	34,16%	22,45%	13,64%	29,75%
Suécia	11,04%	50,00%	14,29%	24,68%
Suiça	29,26%	23,33%	15,56%	31,85%
Grã-Bretanha	13,32%	41,39%	30,03%	15,27%
Portugal	49,06%	5,66%	17,92%	27,36%
Média Europeia	23,92%	33,19%	20,10%	22,79%

Fig. 2.7 - Investimentos na construção na Europa em 2000(FEPICOP, 2010)

A reabilitação urbana pode ter um papel muito importante na retoma da economia e combate ao desemprego.

Segundo o INS em 2009 deu-se uma redução de 8,9% do número de trabalhadores da construção o que representa uma redução de 50 mil trabalhadores em relação ao ano anterior.

Desde de 2002 até 2009 o número de postos de trabalho extintos no setor da construção civil atingiu os 116 mil e esta é uma tendência que se tem continuado a verificar.(INE, 2001)

O investimento na área da reabilitação ganha assim ainda mais importância visto que no mercado da reabilitação de edifícios a componente de mão de obra representa cerca de 2/3 do investimento efetuado. Assim o investimento neste setor contribuiria para a criação de novos postos de trabalho e relançamento da economia.

A reabilitação urbana pode ser assim o grande incentivo necessário ao impulsionamento do setor da construção bem como do mercado de arrendamento.

A confederação Portuguesa da Construção Imobiliária realizou um estudo onde sugere que uma das formas de aumentar a atratividade do setor da reabilitação será a aplicação a aplicação de uma taxa liberatória em sede de IRS para os rendimentos prediais, equivalente àquela já existente para as aplicações financeiras.(CPCI, 2011)

Possíveis investidores encarariam assim o mercado da reabilitação ou arrendamento como uma alternativa viável ao clássico investimento em depósitos de investimento.

De facto, o estudo sugere que a aplicação desta medida representaria um ganho de mil milhões de euros ao longo de 3 anos.

É clara a ligação entre o setor da reabilitação e o mercado do arrendamento. Tornando-se o mercado de arrendamento mais competitivo este incentivaria o investimento em reabilitação que por sua vez criaria mais emprego, maior qualidade de vida para os cidadãos e simultaneamente um maior volume de receitas fiscais para o estado.

Segundo o estudo da CPCI um investimento na aquisição de arrendamento gera no primeiro ano retornos 2,8 vezes superiores em relação a depósitos a prazo de igual valor e um retorno de 8,7 vezes superiores em caso de obras de reabilitação.

Para além disso é assumido pelo governo a necessidade de 70 mil fogos para arrendamento, o estudo da CPCI afirma ser possível cobrir essa necessidade beneficiando o erário público bem como a quantidade de investimento efetuado caso esses fogos sejam provenientes de operações de reabilitação.(CPCI, 2011)

Para além dos fatores económicos, de extrema importância na conjuntura atual, descritos até agora não se pode descurar o facto de que tal como descrito anteriormente o parque habitacional construído nas década de 60,70 e 80 representa metade do parque edificado português.

É importante lembrar que à altura da construção destes edifícios não existia nenhum tipo de regulamentação de caráter térmico ou similar pelo que o seu desempenho higrotérmico e condições gerais de conforto são muito fracas.

Do ponto de vista energético a reabilitação dos edifícios antigos irá também permitir a redução do custo da fatura energética por eles consumida.

2.3. SOLUÇÕES TRADICIONAIS NA REABILITAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS

De uma forma geral são três as soluções mais correntemente utilizadas na reabilitação da envolvente de edifícios:

- Isolamento térmico na caixa de ar no caso das paredes duplas;
- Isolamento térmico pelo interior;
- Isolamento térmico pelo exterior;

2.3.1. ISOLAMENTO TÉRMICO NA CAIXA DE AR

Esta solução de reabilitação apenas pode ser executada nos casos em que o paramento exterior é constituído por uma parede dupla.

Este método consiste na injeção na caixa de ar, através de furos efetuados no paramento, de um material isolante preenchendo totalmente a caixa de ar.

Antes desta operação é preciso no entanto cuidados relativamente ao estado do paramento de forma a evitar o contacto do material de isolamento com humidade bem como uma correta escolha do material isolante de forma a este não sofrer alterações ao longo do tempo.

É também difícil, neste caso, garantir a homogeneidade do preenchimento da caixa de ar.

2.3.2. ISOLAMENTO PELO INTERIOR

No isolamento térmico pelo interior são utilizados geralmente painéis pré-fabricados consistidos por uma camada isolante e um paramento de gesso cartonado.

Os painéis podem ser colados diretamente na face interior da parede de suporte ou serem fixados através de uma estrutura de apoio.

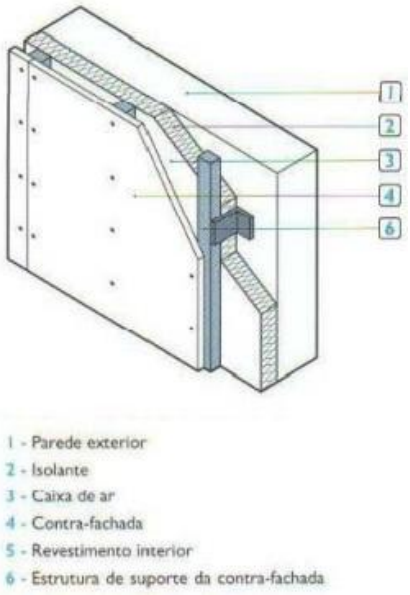


Fig. 2.8 - Isolamento pelo interior(HENRIQUE, 2007)

O isolamento pelo interior é a solução menos dispendiosa e de mais fácil implementação podendo ser aplicada em frações isoladas de um edifício e não em toda a sua extensão.

No entanto, esta solução apresenta algumas desvantagens como a diminuição do espaço útil interior bem como não possibilitar a correção das pontes térmicas lineares e também a diminuição da inércia térmica.

2.3.3. Isolamento térmico pelo Exterior

O isolamento térmico pelo exterior, quando possível, apresenta várias vantagens relativamente ao isolamento térmico pelo interior.

Além de permitir a manutenção da inércia térmica do edifício, funcionando toda a massa existente antes do isolamento como acumulador de calor permite também a reabilitação integrada da fachada do edifício caso seja necessário.

A solução de isolamento pelo exterior mais comummente utilizada em obras de reabilitação consiste no uso de sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior com revestimentos aplicados sobre o isolante, vulgo ETICS.

Esta solução consiste na fixação através de colagem ou fixação mecânica de placas de isolante térmico com revestimento exterior contínuo armado que garante a proteção contra as ações atmosféricas.

O ETICS permite a criação de uma barreira às trocas térmicas entre o ambiente interior e o clima exterior. Para além disso, visto o revestimento ser aplicado sobre o isolante, permite uma solução simples para a reabilitação visual de fachadas.

O sistema é geralmente subdividido consoante o revestimento seja espesso ou delgado.

Apresenta-se de seguida um esquema sobre esta solução construtiva.

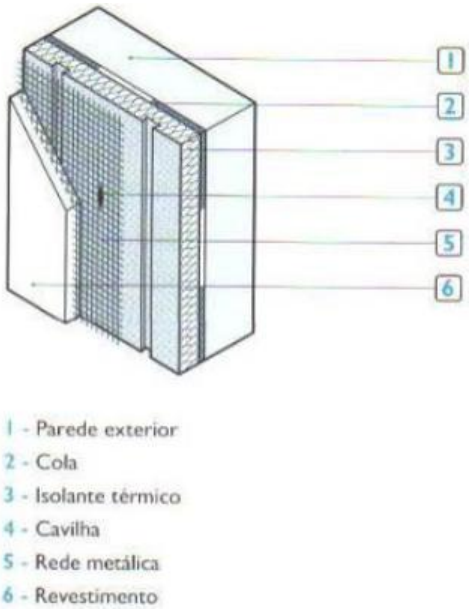


Fig. 2.9 - ETICS revestimento espesso(HENRIQUE, 2007)

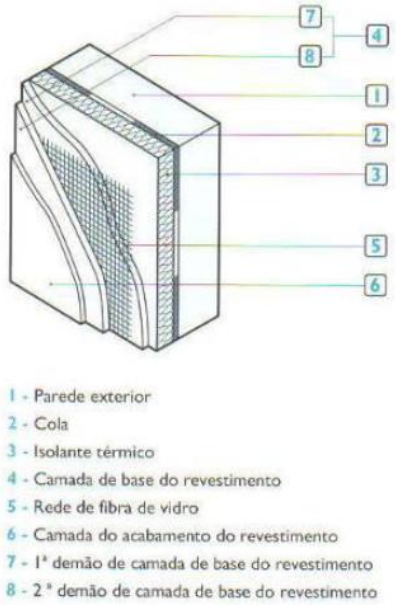


Fig. 2.10 - ETICS revestimento delgado(HENRIQUE, 2007)

Outra solução de isolamento pelo exterior usada correntemente consiste na aplicação de revestimento independente descontínuo com isolante térmico na caixa de ar.

Este tipo de sistema de fachada ventilada consiste na instalação de uma camada de isolante térmico fixo diretamente à parede de fachada existente.

O revestimento independente descontínuo é fixo à parede através de uma estrutura intermédia metálica ou em madeira ou ainda através de fixações pontuais da placagem exterior.

Um esquema deste tipo de sistema é apresentado de seguinte.

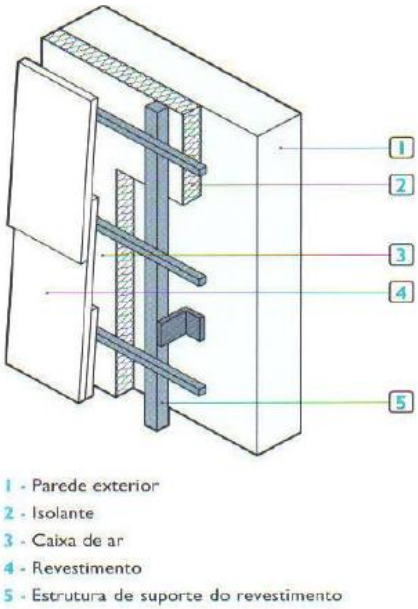


Fig. 2.11 - Fachada ventilada(HENRIQUE, 2007)

2.4. PRÉ-FABRICAÇÃO

2.4.1. INTRODUÇÃO

Existem inúmeras vantagens numa maior adoção da pré-fabricação na indústria da construção.

Deslocando os processos complexos de construção do estaleiro de obra para o ambiente controlado em fábrica é possível identificar mais facilmente bem como tornar mais eficazes os passos críticos da fabricação e montagem das diferentes soluções construtivas através de uma análise cuidada e controlada dos diferentes passos envolvidos.

É também mais fácil garantir a qualidade e replicabilidade dos produtos produzidos aumentando assim a eficiência da indústria de construção.

2.4.2. AS VANTAGENS E DESVANTAGENS DA PRÉ-FABRICAÇÃO NA INDUSTRIA DA CONSTRUÇÃO

Hoje em dia os prazos propostos para o planeamento e execução de obras são fatores muito importantes no setor da construção civil e são um dos fatores mais importantes na avaliação da qualidade e competitividade de cada proposta.

A melhoria dos fatores ambientais e de poupança de energia ganha cada vez maior relevo tanto na indústria como na sociedade em geral e a pré-fabricação é sem dúvida um bom meio para os atingir.

O setor da construção civil em Portugal é um setor onde abundam as pequenas empresas com pessoal não especializado responsáveis por obras de características diferentes que dificultam o desenvolvimento de produtos e processos de fabrico estandardizados. A pré-fabricação é a forma de transformar o setor num setor industrializado.

De facto, o setor a pré-fabricação apresenta inúmeras vantagens (COUTO, 2007):

- A produção é realizada em unidades industriais num ambiente onde é possível efetuar um controlo de qualidade eficaz;
- Maior rapidez da execução em obra fruto da capacidade de armazenamento em fábrica bem como da sistematização e planeamento de todos os passos construtivos;
- Permite aumentar a segurança tanto estrutural como a segurança relativa às condições de trabalho, esta última especialmente ligada à diminuição substancial do tempo de trabalho em estaleiro bem como do emprego de pessoal mais especializado e equipamentos mais eficientes;
- Cuidado não só no planeamento da construção mas também da desconstrução e consequentemente aproveitamento e reciclagem de materiais;
- Diminuição da área de estaleiro em obra;
- Redução da produção de ruído e resíduos em obra;
- Redução dos custos de manutenção e fiscalização;
- A repetibilidade e estandardização dos processos permitem uma crescente qualidade e eficiência no processo construtivo;
- Os benefícios no campo da sustentabilidade são também importantes como comprova um estudo realizado pelo programa PREPARE (Preventive Environmental Protection Aproches) onde se considera que com a adoção da pré-fabricação na indústria da construção civil haja:
    - 50% menos água utilizada na construção de uma casa típica;
    - 50% menor recurso a materiais provenientes de pedreira;
    - 50% de poupança de energia.

No entanto, apesar destas inúmeras vantagens, o setor da pré-fabricação apresenta também desvantagens e entraves à sua adoção em lugar das soluções de construção tradicionais (COUTO, 2007):

- Muitas vezes é necessário o recurso a elementos de ligação adicionais;
- Maior exatidão no estudo do projeto e pormenorização;
- Maior necessidade no controlo de fabricação;
- Muito rigor nas formas e pormenores;
- Necessidade de recorrer quase exclusivamente a mão de obra especializada;
- É necessário existir uma cadeia instalada desde da fabricação até à instalação que esteja acessível e cujo uso seja economicamente viável.

2.4.3. Conceito de Sistema Construtivo

Um sistema é a combinação de dois ou mais elementos usados numa combinação específica.

Um edifício pode ser encarado como um sistema visto ser constituído por partes distintas organizadas e ligadas entre si sendo o responsável por esta coordenação o arquiteto ou engenheiro, por exemplo.

Sendo então um edifício um sistema este pode ser dividido em partes individuais mais simples, não sobrepostas e complementares entre si. A esta divisão dá-se o nome de subsistemas de construção.

A divisão dos elementos que constituem um edifício pode continuar, tendo assim:

- Subsistemas de Construção – "é um conjunto de elementos de construção que representa uma parte do edifício com características próprias e que lhe confere uma certa identidade;"
- Elemento de construção – "é um elemento constituinte de um sub sistema de construção aplicado no seu local de utilização e realizado a partir de materiais simples, componentes e processos de construção;"
- Componente – "é um produto fabricado em unidade industrial a partir de diversos materiais simples e que se destina a ser incorporado num elemento de condução de acordo com processos de construção e montagem bem definidos."(FARIA, 2004)

A decomposição do edifício em subsistema, elementos e componentes permite a elaboração de um mapa de trabalhos e a descrição de todas as tarefas e materiais utilizados o que se torna extremamente útil e indispensável na industria da construção.

2.4.4. Conceitos sobre Pré-Fabricação

O conceito de pré-fabricação aplicado à indústria da construção tem como objetivo dotar a indústria dos métodos e benefícios que provêm da produção de produtos em indústrias de unidade de produção fixa.

As principais formas de atingir esse objetivo são:

- Racionalização – dotar o setor da construção com métodos e formas de organização, planificação e verificação aplicados aos elementos fabricados com vista a aumentar o seu rendimento e qualidade;
- Mecanização – utilização de meios mecânicos em substituição ao homem com vista a aumentar o rendimento e qualidade do produto;
- Pré-fabricação – consiste na produção fora do local da obra dos materiais e componentes que serão depois nela instalados.(FARIA, 2004)

A pré-fabricação divide-se em três classes:

- Pré-fabricação pesada – esta é a forma de pré-fabricação mais comummente utilizada na industria de construção civil e aquela mais difundida em Portugal. Trata-se da produção de elementos ou componentes prefabricados de grande peso, geralmente de elementos em betão armado e pré-esforçado.

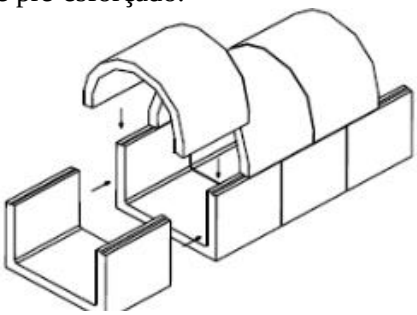


Fig. 2.12 - Exemplo de pré-fabricação pesada, passagem inferior

- Pré-fabricação leve- associada a componentes de pequeno peso com métodos de montagem que não necessitam ou recorrem pouco a métodos de ligação por argamassas;

Fig. 2.13 - Exemplo de pré-fabricação leve, piso técnico(CYPE, consultado em 20/01/2012)

- Pré-fabricação ligeira – produção de componentes de pequenas dimensões. Grandes séries destes componentes são fabricadas o que permite um preço mais competitivo e um aumento do controlo de qualidade. Geralmente estes componentes são montados em obra associados a sistemas de montagem bem definidos.(FARIA, 2004)

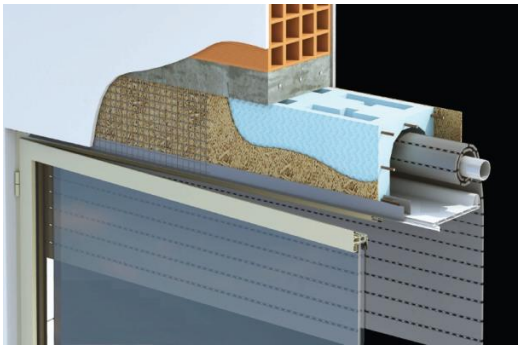


Fig. 2.14 - Exemplo de pré-fabricação ligeira - Caixa de estore

Um sistema de pré-fabricação pode ser considerado um sistema aberto quando permite o uso e incorporação de produtos provenientes de outro fabricante sem a imposição exaustiva e limitativa de métodos obrigatórios de montagem ou características dos materiais.

Por outro lado, um sistema de pré-fabricação é considerado um sistema fechado quando os diversos componentes que o compõe e os seus métodos de execução são exaustivamente definidos pelo fabricante não sendo admitidos a incorporação de componentes exteriores ao sistema.

Um sistema aberto apresenta inúmeras vantagens como uma maior flexibilidade e adaptação às necessidades do utilizador. Por outro lado, um sistema fechado oferece geralmente uma maior fiabilidade e garantias por parte do fabricante e instalador.

Um sistema pré-fabricado pode também adotar diferentes níveis de pré-fabricação:

- Sistema parcial – "é um conjunto de materiais de construção, componentes e processos de construção concebidos, fornecidos e muitas vezes aplicados pelo fabricante, e que constituem um subsistema (ou parte) de construção de um edifício com elevado índice de industrialização;"
- Sistema total – "é um sistema de construção de um edifício concebido de uma forma totalmente integrada, incluindo a definição de todas as operações na fábrica e no local, e que corresponde a um índice de pré-fabricação muito elevado, reservando para a obra um número reduzido de operações."(FARIA, 2004)

2.5. O ANNEX 50

2.5.1. ÂMBITO E OBJETIVOS

A Agência Internacional de Energia (IEA), neste momento com 26 países membros, foi fundada em 1974 pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) em plena crise do petróleo quando o Mundo começou a despertar para a necessidade de poupança de energia e uso de tecnologias mais eficientes.

O principal objetivo da IEA é assegurar aos seus países membros segurança energética através da conservação de energia, desenvolvimento de energias alternativas e investigação na área energética com o objetivo de implementar um programa internacional de energia.(IEA ECBCS, 2011c)

É neste contexto que surge o Programa para a Conservação de Energia em Edifícios e Sistemas Comunitários (ECBCS). O ECBCS é responsável pela pesquisa e desenvolvimento de soluções aplicáveis no ambiente construtivo que contribuam para a conservação de energia e sustentabilidade ambiental.

O ECBCS foca-se em vários aspetos da conservação de energia em edifícios, tanto a nível de *design*, construção e performance. Este programa realiza estudos nas seguintes áreas:

- Sistemas energéticos de escala;
- *Performance Benchmarking;*
- *Design* de sistemas integrados incluindo fontes de energia renovável;
- Renovação e modernização;
- Tecnologias construtivas;
- Iluminação elétrica e natural;
- Medição, gestão e auditoria de energia;
- Estudo ambiental;
- Simulação térmica;
- Ventilação;
- Controlo da humidade em edifícios.(IEA ECBCS, 2011b)

O programa ECBCS é controlado por um comité executivo que para além de monitorizar os projetos existentes é também responsável por identificar áreas de investigação em que a colaboração entre diferentes entidades seja benéfico para os objetivos do programa.

Cada um dos projetos iniciado pelo ECBCS recebeu a denominação de Annex seguido do número que o identifica.

O Annex 50 "*Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings"* (Sistemas pré-fabricados com baixo custo energético para a reabilitação de edifícios residenciais) foi o programa desenvolvido pelo ECBS que possui interesse em analisar para este relatório.

Os edifícios existentes são responsáveis por grande parte do consumo energético dos países desenvolvidos.

Estudos indicam que em 2050 os edifícios construídos antes do ano 2000 serão responsáveis por 80% do consumo do total de energia usada em edifícios.(IEA ECBCS, 2011a)

É assim claro de verificar que a reabilitação representa, ou deveria representar, uma prioridade na indústria de construção e uma elevada importância nos estudos relacionados com a construção nos países membros da IEA.

O Annex 50 tenta contrariar o modelo atual de reabilitação em edifícios onde as ações de reabilitação são focadas isoladamente em sistemas singulares do edifício tais como coberturas, fachadas ou sistemas de aquecimento não havendo um plano de reabilitação global e integrado levando assim a soluções ineficientes e dispendiosas.

O Annex 50 tentou desenvolver e testar soluções de reabilitação inovadoras que encarem os edifícios como um todo e que possibilitem minimizar o uso de energia para aquecimento, arrefecimentos e água quente doméstica.(IEA ECBCS, 2011a)

As soluções estudadas no Annex 50 focaram-se no uso de módulos de cobertura e fachada pré-fabricados estandardizados que melhorem substancialmente a qualidade da reabilitação bem como o nível de conforto dos ocupantes do edifício.

As vantagens do uso deste tipo de solução são inúmeras:

- Aumento dos níveis de eficiência energética e nível de conforto dos edifícios existentes para níveis comparáveis com os modernos edifícios de baixo consumo energético (30-50 kWh/(m^2.a));
- Otimização da construção, qualidade e custo-benefício através do uso da pré-fabricação;
- Oportunidade para criar um novo espaço de habitação atrativo por adição de pisos pré-fabricados e incorporação das varandas no espaço habitacional;
- Um processo de reabilitação rápido com distúrbio mínimo dos ocupantes.(IEA ECBCS, 2011c)

O projeto Annex 50 teve por base uma equipa multidisciplinar que englobou profissionais de sete países: Áustria, República Checa, França, Holanda, Portugal, Suécia e Suíça.

2.5.2. Conceito do Sistema de Pré-fabricação

O Annex 50 define três características principais que todos os sistemas de módulos pré-fabricados para reabilitação devem obedecer:

- Os módulos são padronizados na construção, camadas e juntas;
- Os módulos são flexíveis em arquitetura, forma e acabamento;
- Os módulos podem ser combinados uns com os outros e com sistemas não pré-fabricados convencionais.(IEA ECBCS, 2010)

O estudo distingue também duas formas distintas de atacar o problema de incorporação dos módulos nas fachadas dos edifícios.

Pode-se optar por um sistema de reabilitação onde é aplicada em toda a fachada do edifício módulos pré-fabricados sendo esta então uma solução completamente pré-fabricada.

Fig. 2.15 - Solução totalmente pré-fabricada(IEA ECBCS, 2010)

Por outro lado, os módulos poderão apenas ser aplicados nas zonas de vãos visto serem estas as zonas de fachada onde existe uma maior concentração de pormenores. As restantes zonas de fachada serão acabadas usando soluções de reabilitação correntes como a instalação de fachadas ventiladas ou uso do sistema ETICS.

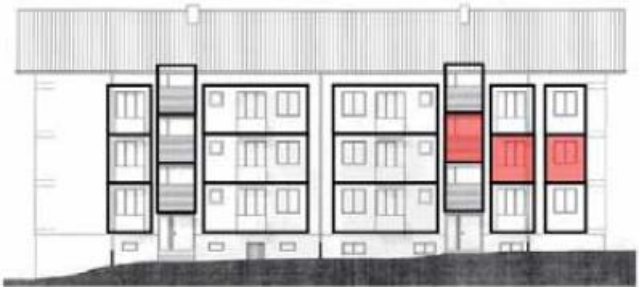
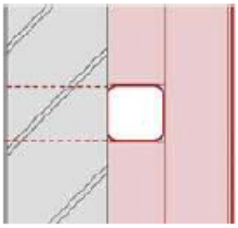
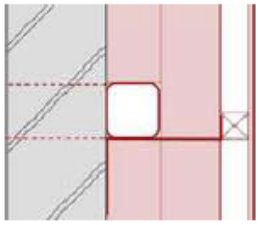
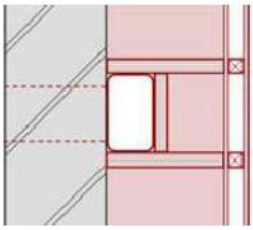


Fig. 2.16 - Solução parcialmente pré-fabricada(IEA ECBCS, 2010)

Foi também desenvolvido um sistema de classificação para os diferentes módulos de forma a ser possível realizar uma distinção entre eles que realce as suas diferentes características.

Assim, os módulos de fachada denominam-se F-type e os módulos de coberturas designam-se por R-type (Roof, cobertura em inglês), neste relatório serão focados os módulos de fachada.

Módulo	Descrição
F1 – Isolamento compacto de fachadas (ETICS) 	Isolamento compacto convencional com camada de isolamento de poliestireno ou lã mineral.
F2 – Fachada ventilada 	Isolamento em lá mineral com espaço de ar entre o isolamento e a camada de revestimento fixa através de um sistema de fixação pré-fabricado.
F4 – Módulo de fachada pré-fabricado 	Isolamento por lã mineral, espuma ou vácuo incorporado na estrutura do módulo que possui também uma camada de revestimento ventilada. Todo o módulo é pré-fabricado incluindo janelas e sistema de condutas integrado.
Continuação na página seguinte	

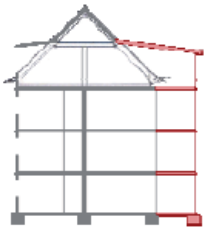
F5 – Ampliação de espaço 	Estrutura de fachada pré-fabricada leves para ampliação de espaços, como integração da zona de varandas no espaço interior.

Fig. 2.17 - Categorias de módulos(IEA ECBCS, 2010)

As categorias acima descritas podem ainda ser subdivididas consoante as diferentes configurações de cada tipo de módulo.

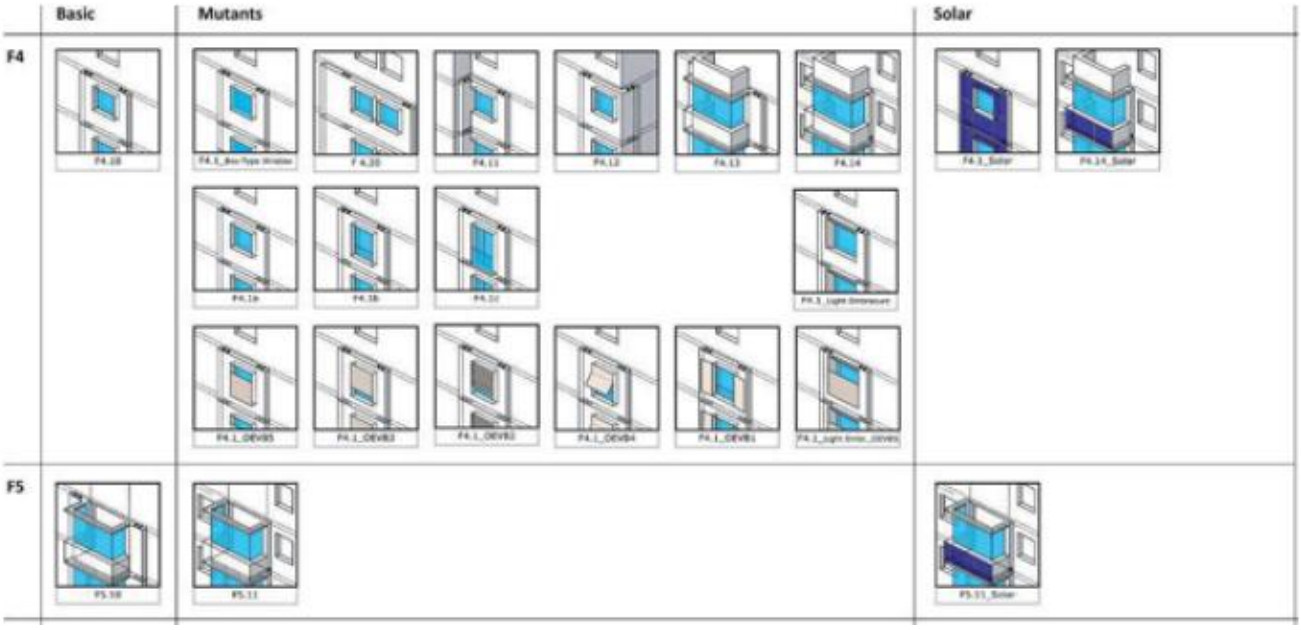


Fig. 2.18 - Variações de design de módulos dentro do mesmo tipo

Segundo este sistema de classificação o módulo em estudo nesta dissertação será do tipo F4.

Nos estudos realizados no âmbito do Annex 50 foram analisados quatro sistemas distintos para o desenho e produção eficiente de módulos de fachada pré-fabricados.

Estes quatro conceitos foram desenvolvidos por equipas nacionais da Áustria, França, Portugal e Suíça tendo por base as necessidades específicas de cada país bem como a adoção dos materiais mais indicados em cada caso na construção.

Descreve-se em seguida os aspetos principais de cada módulo desenvolvido.

2.5.2.1. Módulo Suíço

A equipa Suíça considerou que existem já no mercado soluções correntes de reabilitação de zonas opacas de fachada amplamente aplicadas e testadas que apresentam graus de desempenho adequado.

Sendo assim o sistema Suíço foca-se apenas na aplicação de módulos nas zonas de vãos na fachada de edifícios devido ao facto de serem estas zonas que apresentam a maior quantidade de pormenores construtivos e técnicos sendo assim as áreas mais complexas do ponto de vista da reabilitação.

Os módulos devem possuir um bom comportamento térmico e devem eliminar todas as pontes térmicas.

São usadas janelas de alto desempenho com sistema de ocultação mecanizado.

O módulo divide-se em duas zonas distintas cuja espessura depende do diâmetro das condutas na metade interior do módulo ou da espessura do isolamento térmico na metade exterior.

Essa divisão é bem visível na figura seguinte.

Fig. 2.19 - Protótipo módulo Suíço

Fig. 2.20 - Pormenor de integração de condutas no interior do módulo

A estrutura do painel é realizada em madeira e placas de gesso cartonado de forma a aumentar a sua rigidez.

Na zona corrente do módulo é usada lã de vidro ou lá de rocha como material isolante, no entanto nas zonas de passagem de tubagens ou de janelas onde a espessura disponível para o material isolante é menor são usados painéis de isolamento a vácuo (VIP) que permitem obter o mesmo desempenho com espessuras menores.

As condutas são inseridas em elementos de lã de rocha de forma a garantir o seu isolamento.

As janelas são incluídas no módulo no processo de fabrico e devem apresentar um elevado desempenho.

Os módulos são suportados pelas paredes existentes pelo que não é necessário a construção de fundações adicionais.

Os painéis são fixados ao suporte por montantes em alumínio ou aço inoxidável.

Todos os componentes que criam a moldura do módulo estão inseridos na sua metade interior, como é na metade exterior que se encontram as camadas de isolamento as pontes térmicas são assim eliminadas.

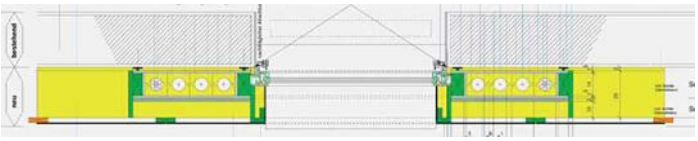


Fig. 2.21 - Corte transversal do módulo

2.5.2.2. Módulo Austríaco

A solução Austríaca é baseada em módulos envidraçados de grandes dimensões totalmente pré-fabricados.

Os módulos possuem a altura de um piso corrente e podem medir até 12m de largura.

Na fachada do edifício alvo da reabilitação é montada uma sub estrutura de madeira onde serão depois montados os módulos pré-fabricados.

Esta subestrutura funciona como uma camada de regularização entre a fachada do edifício e os módulos pré-fabricados, o espaço entre os diferentes montantes de madeira é também utilizado para a colocação de instalações como condutas ou cabos. Todo o espaço é isolado com material isolante adequado.

Fig. 2.22 - Subestrutura de madeira onde serão montados os módulos

O módulo básico encontra-se representado na figura seguinte sendo que da esquerda para a direita se pode observar:

- Parede de fachada existente;
- Subestrutura de apoio em madeira montada na fachada. Entre os montantes da estrutura é colocado material isolante;
- Duas placas OSB com material isolante entre elas;
- Sistema solar constituído por uma placa MDF seguido da colmeia solar com um espaço d ar entre ambos. O revestimento final do módulo consiste num vidro de segurança.

Fig. 2.23 - Módulo básico

Estes módulos básicos são agrupados em fábrica numa estrutura de madeira constituindo assim módulos de maiores dimensões que são depois transportados para obra e montados na fachada através do uso de gruas.

Fig. 2.24 - Montagem do módulo de maiores dimensões em fábrica

A grande inovação do sistema austríaco consiste na utilização do conceito de "isolamento pelo sol" ou "isolamento transparente".

Toda a fachada do edifício é coberta pelos módulos de fachada pré-fabricados.

A superfície de acabamento dos módulos consiste num vidro de segurança permeável à radiação solar. Imediatamente após o vidro encontra-se um espaço de ar ventilado e uma estrutura de celulose em forma de favo de mel.

De forma a criar uma aparência agradável a superfície do favo de mel é pintada de diferentes cores.

Durante o inverno, altura em que o sol se encontra mais baixo, a estrutura em favo de mel deixa a radiação solar penetrar no seu interior pelo que a temperatura na superfície no tardoz da estrutura aumenta. A diferença de temperatura entre o interior quente e o exterior frio é diminuída e assim são diminuídas também as perdas térmicas.

Durante o verão a estrutura em favo de mel impede a radiação solar de atingir a placa no seu tardoz devido ao facto de durante este período o Sol se encontrar mais alto.

Este princípio de funcionamento deve ser estudado com atenção visto a sua adequação a climas mais quentes durante o Verão ser questionável.

O espaço de ar entre o vidro de segurança e a estrutura em favo de mel é ventilado pelo que o módulo possui também características de uma fachada ventilada.

Fig. 2.25 - Detalhe da estrutura em favo de mel e a sua aplicação no módulo

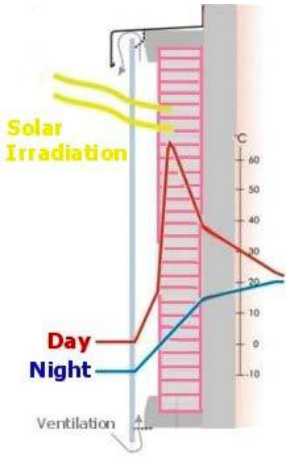


Fig. 2.26 - Princípio de funcionamento do elemento solar

Neste sistema está também prevista a possibilidade de nas fachadas orientadas a Sul serem utilizados coletores solares embutidos nos módulos para aquecimento de águas sanitárias.

Fig. 2.27 - Fachada com módulos com coletores solares embutidos (a escuro) juntamente com os módulos básicos (a cinzento)

2.5.2.3. Módulo Francês

O sistema francês, denominado RECOLCI, é focado essencialmente em grandes elementos verticais montados numa subestrutura em metal.

O sistema francês foi pensado para oferecer o máximo de flexibilidade possível de forma a se adaptar a vários tipos de morfologia de fachada diferentes e oferecer uma aplicação estandardizada.

O sistema é autoportante e permite a adição de um andar extra no topo do edifício alvo da reabilitação.

Os módulos têm a altura de dois andares e são montados verticalmente uns em cima dos outros da cobertura até às fundações.

Os módulos são fixos à estrutura de forma a garantir uma ancoragem eficaz mas as cargas verticais são transmitidas pela estrutura dos módulos até a uma fundação independente da do edifício existente.

Antes da montagem dos módulos é aplicada na fachada do edifício uma camada isolante segundo técnicas correntes.

Os módulos são realizados em aço sendo a colocação do isolamento e instalação de janelas realizados em fábrica. São capazes de receber qualquer tipo de acabamento sendo este procedimento realizado em obra.

Os módulos possuem uma construção modular o que lhes permite serem ajustados em tamanho consoante as necessidades de cada tipo de fachada e das dimensões das janelas.

Módulos de diferentes tamanhos podem ser usados na mesma fachada dos edifícios de forma a garantir uma correta adaptação da estrutura à geometria da fachada.

No entanto, apesar da possível variação das dimensões dos painéis estes são sempre fabricados da mesma forma sem modificação do *design* visto o processo de fabrico ser também estandardizado.(IEA ECBCS, 2010)

Fig. 2.28 - Montagem do módulo em fábrica

Fig. 2.29 - O acabamento do módulo é realizado em obra, neste caso uma fachada ventilada

Na imagem seguinte podemos ver à esquerda um módulo de dois andares e à direita dois módulos ligados horizontalmente. Entre ambos os módulos são instaladas barras de reforço para reforçar a estrutura sendo depois estas cobertas por isolamento.

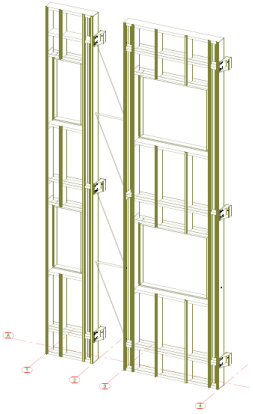


Fig. 2.30 - Esquema dos módulos RECOLCI

Aliado à instalação dos módulos está também no desenho deste sistema a dotação dos edifícios com um sistema de ventilação central cujas tubagens são instaladas nos espaços entre módulos e com recuperadores de calor individuais em cada habitação.

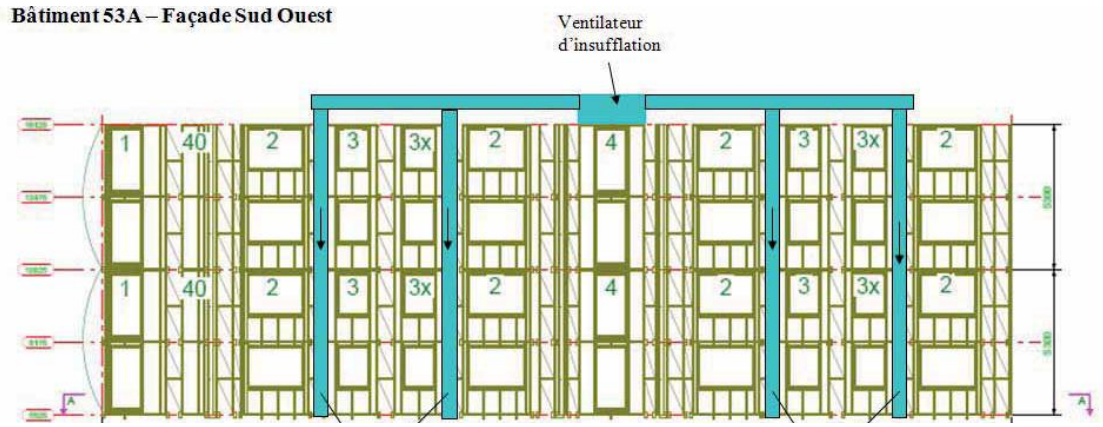


Fig. 2.31 - Esquema da estrutura de fachada formada pelos módulos e do sistema de ventilação (a azul)

O módulo francês apresenta um coeficiente de transmissão térmica de 22W/m^{2o}C que integrado com um sistema de ventilação centralizado permite chegar a valores de 50kW/(m$^{2.}$a) de energia consumida (incluindo aquecimento, arrefecimento e ventilação).

O aspeto mais interessante deste módulo é a sua capacidade de resistência estrutural o que permite a adição de um ou dois andares ao edifico existente, andares esses que podem ser vendidos ou arrendados. O sistema permite também o aproveitamento de varandas convertendo-as em espaços interiores.

O aspeto modular da construção permite que esta solução se adeque a um grande número de edifícios.

2.5.2.4. Módulo Português

O módulo português é um módulo de pequenas dimensões completamente pré-fabricado e que no âmbito do Annex 50 foi desenvolvido por uma equipa da Universidade do Minho não devendo ser confundido com o módulo simulado e estudado neste trabalho.

É baseado em módulos metálicos, isolados e de fácil montagem.

As dimensões de cada módulo são de 1m*1m com um peso de 12kg/m^2.

O desenho do módulo teve em conta a utilização de materiais com grande potencialidade de reutilização ou reciclagem bem como materiais que apresentem baixo consumo energético tanto no período de fabricação como no transporte e aplicação.(IEA ECBCS, 2010)

O módulo é fabricado em alumínio sendo para isolamento usado aglomerado negro de cortiça bem como placas XPS.

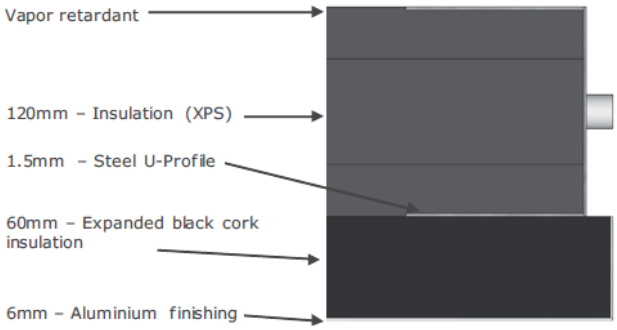


Fig. 2.32 - Corte esquemático do módulo

Os módulos são fixos à fachada do edifício através do uso de montantes em alumínio onde através de um sistema de pinos e calhas os módulos são encaixados.

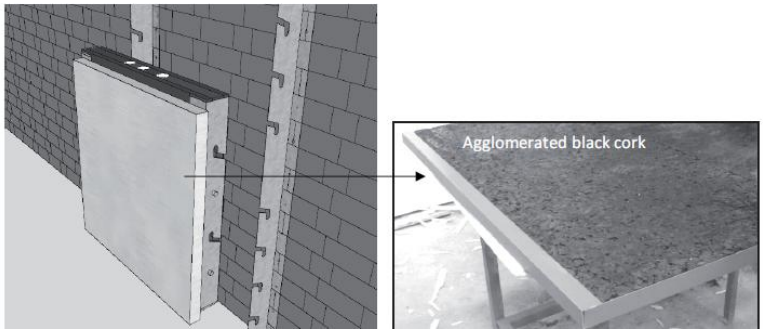


Fig. 2.33 - Sistema de encaixe dos módulos e pormenor do isolamento

O módulo possui uma espessura de cerca de 20cm e a instalação deste sistema na fachada de um edifico irá permitir o aumento da resistência térmica da sua envolvente em cerca de $4m^2.K/W$.

Está também previsto no desenho do módulo a incorporação de um espaço para a passagem de condutas para água, ventilação e aquecimento/arrefecimento.

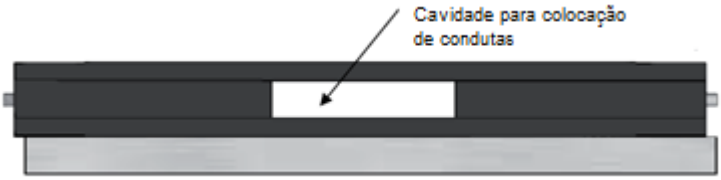


Fig. 2.34 - Espaço para alojamento de condutas no módulo

O sistema de montagem do módulo foi pensado de forma a ser o mais simples possível minimizando o uso de ligações mecânicas ou coladas o mais possível de forma a potenciar as suas capacidades de reutilização e reciclagem.(IEA ECBCS, 2010)

Assim, a estrutura em alumínio do módulo é dobrada de com o objetivo de formar uma caixa funcionando como suporte para a colocação do material de isolamento.

Existe apenas uma ligação colada entre a estrutura em U e o acabamento em alumínio que aloja o aglomerado negro de cortiça.

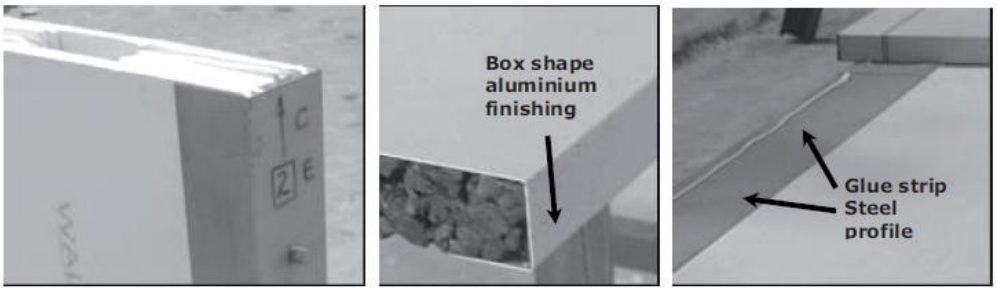


Fig. 2.35 - Montagem do módulo em fábrica

Fig. 2.36 - Modulo acabado e instalado

O módulo apresenta uma resistência térmica de cerca de $4{,}35m^2.K/W$ e um valor de $U=0.23W/(m^2.K)$.

Existem pequenas pontes térmicas entre a ligação módulo/montante bem como na ligação entre módulos, relativamente ao comportamento à humidade o módulo apresenta um bom desempenho.

As vantagens deste módulo residem na simplicidade tanto de fabrico, montagem e manutenção.

Devido ao desenho do sistema de montagem a colocação dos módulos em obra é simples e rápida bem como a sua substituição quer seja por motivos de danos causados ou manutenção.

Salienta-se, como já referido anteriormente que este não foi o módulo estudado nesta dissertação.

O autor optou antes por um sistema mais simples que adota os princípios de uma fachada ventilada incorporando-os num sistema de painel pré-fabricado onde é prevista a funcionalidade adicional do pré-aquecimento do ar de ventilação no inverno.

O módulo será descrito com maior detalhe adiante neste trabalho, nas figuras seguintes encontra-se representado o desenho esquemático do módulo em estudo bem como a sua idealização para fins de simulação.

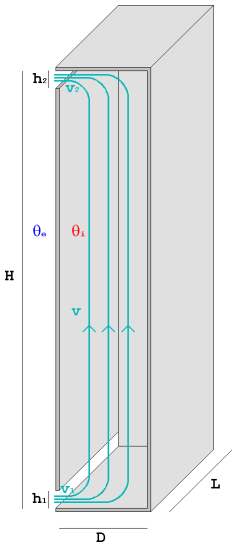


Fig. 2.37 - Esquema do módulo estudado

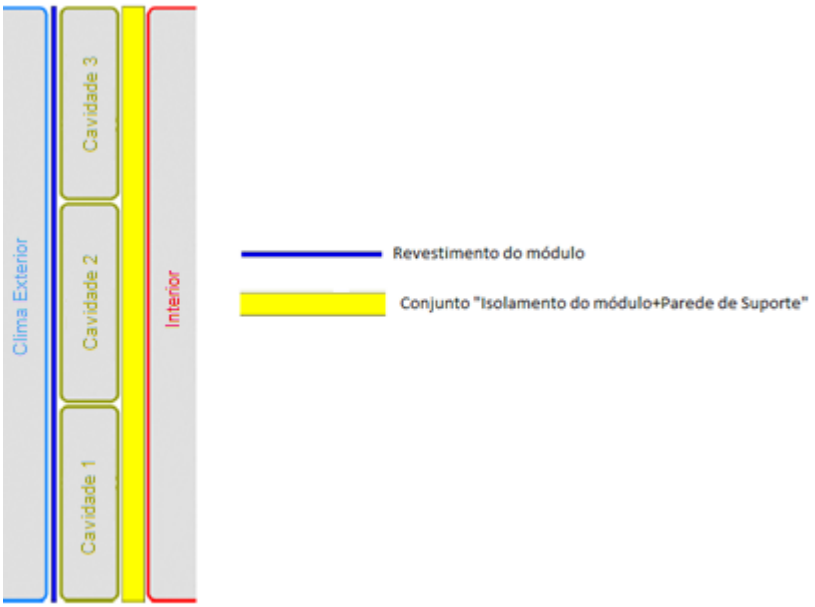


Fig. 2.38 - Esquema de simulação do módulo

3 - Simulações e Resultados

3.1. CAPSOL

3.1.1. O QUE É O CAPSOL

CAPSOL é um programa que permite simular a transferência de calor estática ou dinâmica entre diferentes zonas. O programa calcula a condução de calor unidimensional, por convecção, transmissão infravermelha tendo em conta o facto de forma, ventilação multizona bem como a radiação solar.(PHYSIBEL, 2002)

O esquema de cálculo do programa é constituído por um sistema de equações referentes ao balanço energético, que é resolvido a cada passo de cálculo através de um método de diferenças finitas.

O cálculo estático é utilizado para determinar as condições iniciais do sistema bem como para estimar as necessidades de aquecimento e refrigeração.

3.1.2. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO CAPSOL

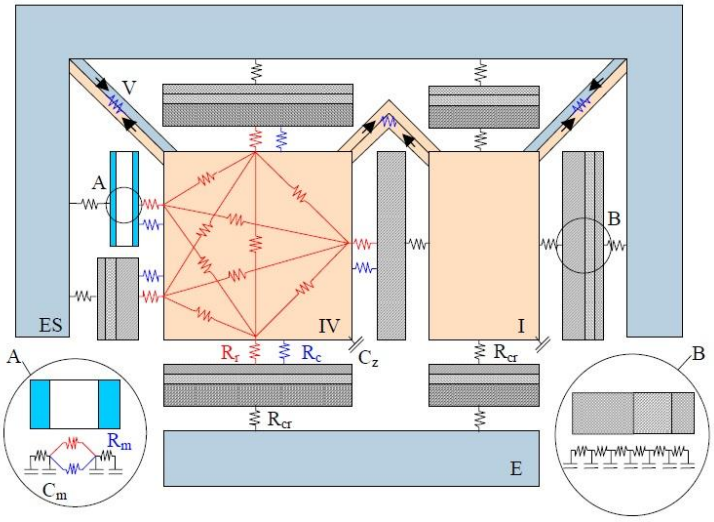


Fig. 3.1 - Esquema básico CAPSOL, transmissão de calor entre zonas por condução, convecção e radiação-infravermelha

O modelo de cálculo do CAPSOL é baseado numa rede de resistências e condensadores térmicos.

Cada componente (paredes, pavimentos, tetos, etc) é representado por uma série de resistências (R) e condensadores (C_m). Os espaços de ar são simulados ou por uma resistência convectiva paralela a uma resistência radiativa (A) ou usando uma resistência térmica equivalente (B).

Os componentes separam zonas que podem ser de diferentes tipos. As zonas podem ser interiores ou exteriores.

As zonas interiores (I, IV) apresentam um dado volume e consequentemente um condensador térmico (C_z), as zonas exteriores (E, ES) não possuem nenhum dos dois.

Nas zonas interiores a transmissão de calor entre superfícies é realizada por convecção e radiação-infravermelha. Estes dois fenómenos podem ser combinados (zona I) usando resistências que combinam a convecção e radiação infravermelha (R_{cr}) ou podem ser separados e calculados separadamente (zona IV) usando resistências convectivas (R_c) e resistências dependentes do fator de forma da radiação-infravermelha (R_r).(PHYSIBEL, 2002)

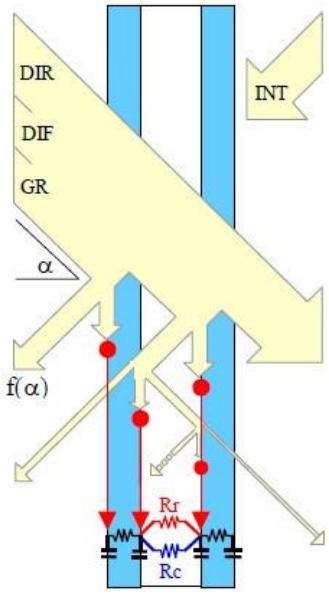


Fig. 3.2 – Esquema básico CAPSOL, condução, convecção, radiação infravermelha e solar

Um elemento no CAPSOL pode ser opaco, transparente ou uma combinação dos dois.

A reflexão da radiação solar incidente na superfície exterior do elemento resulta da soma da radiação direta (DIR), difusa (DIF) e proveniente da reflexão do solo (GRF) sendo dependente do ângulo de incidência (α). Para além disso podem ser simulados obstáculos que limitam a quantidade de radiação solar incidente como prédios, árvores, etc.

A radiação solar que incide na superfície interior do elemento (INT) e proveniente de superfícies adjacentes à zona interior é tratada da mesma forma que a radiação exterior não sendo no entanto tido em conta o ângulo de incidência.(PHYSIBEL, 2002)

De seguida serão descritos quais os *inputs* que devem ser dados ao programa de cálculo CAPSOL de forma a simular convenientemente um módulo de painel de fachada com as características daqueles adotados neste estudo.

Serão também explicadas algumas considerações e opções tomadas ao longo da simulação.

3.1.3. PARÂMETROS DE CÁLCULO

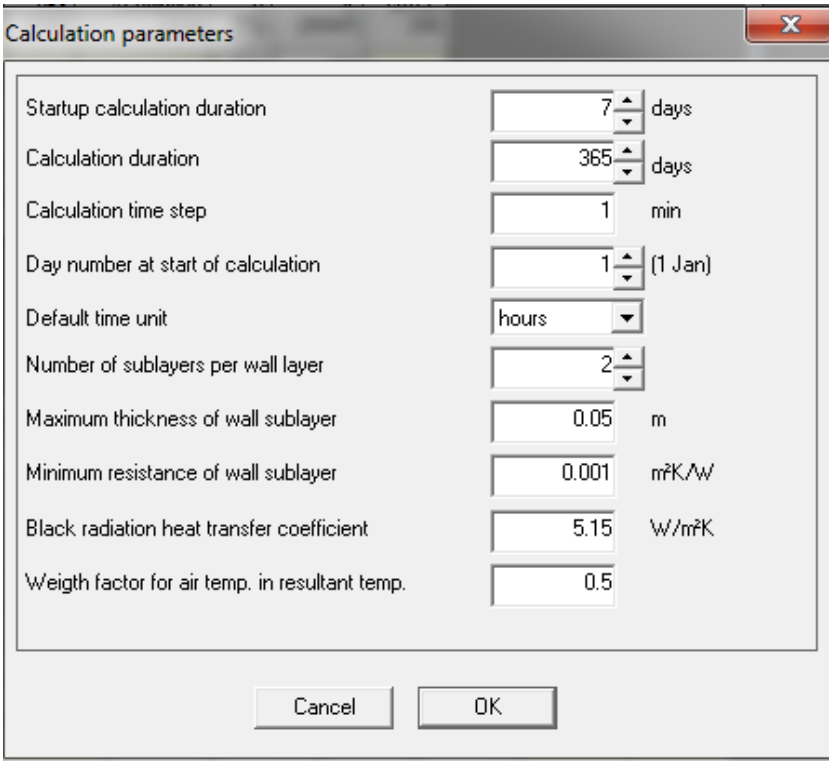


Fig. 3.3 - Parâmetros de cálculo do CAPSOL

Esta janela permite definir vários parâmetros que o CAPSOL irá ter em conta no seu processo de cálculo.

- ***Startup calculation duration*** – número de dias que o CAPSOL irá simular antes do dia definido para o início da simulação. Isto permite arrancar a simulação com valores dinâmicos. Considerou-se que uma pré-simulação de 7 dias apresenta um bom ponto de partida para a simulação em estudo;
- ***Calculation duration*** – número de dias de simulação;
- ***Calculation time step*** **–** passo de cálculo adotado pelo programa. Foi escolhido o valor de 1 minuto de forma a melhor ter em conta os processos de transferência térmica pelo ar e evitar assim flutuações exageradas dos valores registados para as temperaturas na caixa de ar do módulo;
- ***Day number at start of calculation*** **–** dia de início da simulação;
- ***Number of sublayers per wall layer*** **–** este valor representa o número mínimo de resistências ou condensadores que serão usados para simular uma camada de um elemento no CAPSOL. Foram consideradas no mínimo duas resistências para cada camada conforme aconselhado no CAPSOL *Pilot book*;(PHYSIBEL, 2004)
- ***Maximum thickness of Wall sublayer*** **–** este parâmetro representa a espessura de cada camada que será simulada por uma resistência. Assim, quanto menor for este valor maior será o número de resistências necessárias para simular uma camada de um dado elemento. Mais uma vez teve-se em conta a sugestão dada pelo *pilot book* do CAPSOL e considerou-se um valor de 0,05m;

- ***Minimum resistence of Wall sublayer*** **–** de forma a prevenir erros de cálculo é considerada durante o cálculo um valor mínimo para a resistência de cada camada. O valor recomendado é de 1E-5 m^2K/W;
- ***Black radiation heat transfer coeficient*** **–** o valor para o coeficiente de radiação negra foi admitido de 5.15 W/m^2K tal como explicado no manual do CAPSOL (PHYSIBEL, 2002) tendo em conta uma temperatura média das superfícies em estudo de 12ºC;
- ***Weight fator for air temp. in resultant temp.*** – este valor é usado no cálculo da temperatura de conforto. Foi considerado o valor pré-definido de 0.5 como sugerido em (PHYSIBEL, 2004);

3.1.4. IMPORTAÇÃO DOS DADOS CLIMÁTICOS DO SOLTERM

Os ficheiros do Solterm que contêm os dados climáticos para as diversas cidades portuguesas foram usados como fonte para definir o clima no programa CAPSOL.

```
5.0
: ---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
 TRY para RCCTE/STE e SOLTERM
 INETI(2006)  www.ineti.pt  sec.der@ineti.pt
: ---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
: Zona
Porto
: Longitude (°W)
8.62
: Latitude (°N)
41.16
: Altitude (m)
100
: ---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
: Período
 1961-1990 (nominal)
: ---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
: Temperatura [°C*10]                              - climatologia e algoritmos INETI-DER (2004)
: Precipitação [mm]                                - sem dados
: Humidade relativa [%]                            - climatologia e algoritmos INETI-DER (2004)
: Vento - magnitude [m/s*10]                       - sem dados
: Vento - rumo[0°...359° 0°=N]                     - sem dados
: Pressão [hPa]                                    - sem dados
: Nebulosidade total [0...10 limpo a coberto]      - algoritmos INETI-DER (2004)
: Nebulosidade opaca [0...10 limpo a coberto]      - algoritmos INETI-DER (2004)
: Radiação solar - global horizontal[W/m²]         - climatologia e algoritmos INETI-DER (2004)
: Radiação solar - difusa horizontal[W/m²]         - climatologia e algoritmos INETI-DER (2004)
: Radiação solar - global vertical N [W/m²]        - algoritmo Muneer (1990) com albedo do solo 20%
: Radiação solar - global vertical NW [W/m²]       - algoritmo Muneer (1990) com albedo do solo 20%
: Radiação solar - global vertical W [W/m²]        - algoritmo Muneer (1990) com albedo do solo 20%
: Radiação solar - global vertical SW [W/m²]       - algoritmo Muneer (1990) com albedo do solo 20%
: Radiação solar - global vertical S [W/m²]        - algoritmo Muneer (1990) com albedo do solo 20%
: Radiação solar - global vertical SE [W/m²]       - algoritmo Muneer (1990) com albedo do solo 20%
: Radiação solar - global vertical E [W/m²]        - algoritmo Muneer (1990) com albedo do solo 20%
: Radiação solar - global vertical NE [W/m²]       - algoritmo Muneer (1990) com albedo do solo 20%
: Radiação IV - celeste descendente [W/m²]         - algoritmos 4th ESRA (1999)
: Iluminância - global horizontal [lux]            - algoritmos CEC Daylighting Atlas (1995)
: Iluminância - difusa horizontal [lux]            - algoritmos CEC Daylighting Atlas (1995)
: Iluminância - directa normal [lux]               - algoritmos CEC Daylighting Atlas (1995)
: Luminância zenital [Cd/m²]                       - algoritmos CEC Daylighting Atlas (1995)
: ---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
 1  1  1  81    0  84    0   0 1013 10  7    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0  315      0      0      0      0
 1  1  2  74    0  86    0   0 1013 10  7    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0  312      0      0      0      0
 1  1  3  67    0  89    0   0 1013 10  3    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0  309      0      0      0      0
 1  1  4  60    0  91    0   0 1013 10  2    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0  306      0      0      0      0
 1  1  5  53    0  94    0   0 1013 10  5    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0  303      0      0      0      0
 1  1  6  46    0  96    0   0 1013 10  8    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0  300      0      0      0      0
 1  1  7  39    0  99    0   0 1013 10  9    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0  297      0      0      0      0
 1  1  8  42    0  98    0   0 1013  2  2   10    9    4   11   27   31   20    4    4    4  263   1347   1172   1027    236
 1  1  9  49    0  95    0   0 1013 10  8   28   25   12   15   30   36   29   14   12   12  301   3965   3255   1082    673
 1  1 10  62    0  91    0   0 1013 10  7   40   36   17   17   31   37   34   24   17   17  307   5736   4687   1041   1005
 1  1 11  77    0  85    0   0 1013 10  7   70   62   29   29   46   56   56   46   29   29  314  10048   8072   1743   1803
 1  1 12  93    0  80    0   0 1013 10  3   61   55   26   26   35   45   48   42   26   26  321   8800   7161   1198   1641
```

Fig. 3.4 - Folha de dados climáticos do Solterm para o Porto

A informação importada do Solterm permitiu a construção de três funções distintas usadas pelo CAPSOL que no conjunto caracterizam o clima de cada cidade estudada:

- **Temperatura [°C]** – função FTE, informação na coluna 4 do Solterm;
- **Radiação solar global horizontal [W/m^2]** – função FSG, informação na coluna 12 do Solterm;
- **Radiação solar horizontal difusa [W/m^2]** - função FSD, informação na coluna 13 do Solterm.

Outros parâmetros climáticos como a humidade, velocidade e direção do vento não são considerados pelo CAPSOL pelo que não foram usados nas simulações realizadas

	A	B
1	COM Climatic data Porto (Portugal)	
2	TIM 0 3600 8760	
3	FMT 7 1 1 -10 30	
4	DAT 1 41.16 0 0	
5	NFT 86400 30 10 5 1 0 365 0 1	
6	FTE	7.4
7	FTE	8.1
8	FTE	7.4
9	FTE	6.7
10	FTE	6
11	FTE	5.3
12	FTE	4.6
13	FTE	3.9
14	FTE	4.2
15	FTE	4.9
16	FTE	6.2

Fig. 3.5 - Folha de dados climáticos do CAPSOL da temperatura para o Porto, função FTE

Modificações efetuadas na importação dos dados do Solterm para uma função FTE do CAPSOL:

- Na célula A1 foi inserido o nome da cidade e do país, neste caso Porto (Portugal);
- Na célula A4 foi inserida a latitude da cidade do Porto (41.16) foi atribuído um valor nulo para a longitude e a time zone conforme recomendado no manual do CAPSOL(PHYSIBEL, 2002):
- Na célula B6 em diante foram inseridos os valores das temperaturas horárias retiradas dos ficheiros de dados climáticos do Solterm.

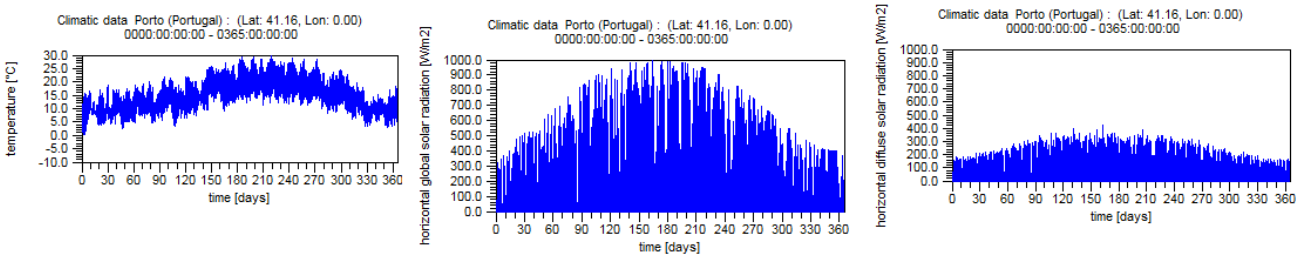


Fig. 3.6 - Funções FTE, FSG e FSD usadas pelo CAPSOL obtidas através dos dados do Solterm para o Porto

Para cada zona climática são criadas assim no CAPSOL três funções distintas. Usando o Porto como exemplo, para definir esta zona climática são usadas as funções FTE_Porto, FSG_Porto e FSD_Porto.

3.1.5. PARÂMETROS DA ZONA SOLAR

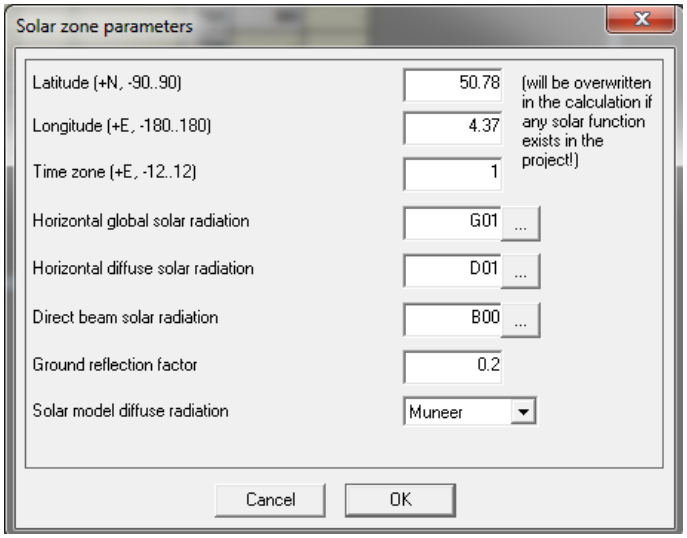


Fig. 3.7 - Parâmetros da zona solar

Nesta janela são definidas as características que definem a zona solar (clima exterior):

- **Latitude e Longitude -** são obtidas através da informação contida nas funções solares (FSD e FSG descritas anteriormente);
- **Radiação horizontal global e radiação horizontal difusa** – as funções G01 e D01 são funções características de cada zona climática. Os valores de G01 correspondem aos valores da função FSG da zona climática em simulação. O mesmo se aplica à função D01 que assume os valores da função FSD da zona climática em estudo;
- **Radiação solar direta** – Não foram indicados valores para este parâmetro visto o CAPSOL apenas necessita da definição de duas funções referentes à radiação e a combinação G-D ser a mais usada como referido em (PHYSIBEL, 2002);
- **Fator de reflexão do solo** – foi considerado o valor de 0.2 representativo de um solo normal;
- **Modelo solar –** existem dois modelos de cálculo disponíveis, o isotrópico e o de Muneer. Nas simulações realizadas foi usado o modelo de Munner visto ser mais preciso como referido em (PHYSIBEL, 2002). No modelo de Munner, mais complexo mas mais preciso, a radiação difusa numa superfície é derivada da radiação horizontal difusa tendo em conta vários parâmetros como a inclinação da parede, a visibilidade do Sol, a nebulosidade, etc.

3.1.6. Definição de Zonas

O CAPSOL é um programa de cálculo baseado na transferência de calor entre diferentes zonas.

É assim necessário definir as zonas que serão consideradas nas simulações.

					Steady-state calculation							Dynamic calculation		
Zone	**Name**	Type	V [m³]	ρc [J/m³K]	θ-w [°C]	Qfree-w [W]	n-w [1/h]	θ-s [°C]	Qfree-s [W]	n-s [1/h]	Ventilation zone	θ [°C]	Ir [W/m²]	Qfree [W]
1	Exterior	**ES**	-	1200	0	-	-	30	-	-	-	**T01**	**I00**	-
2	Interior	**E**	-	1200	20	-	-	25	-	-	-	**T04**	-	-
3	E1	**IV**	0.05	1200	0	0	0	0	0	0	**NIHIL**	-	-	**P00**
4	E2	**IV**	0.05	1200	0	0	0	0	0	0	**NIHIL**	-	-	**P00**
5	E3	**IV**	0.05	1200	0	0	0	0	0	0	**NIHIL**	-	-	**P00**

Fig. 3.8 - Zonas definidas no CAPSOL

- **Exterior** – zona exterior solar (clima exterior) com temperatura conhecida. A temperatura é determinada pela função T01 que representa os valores médios horários da temperatura na zona climática em estudo;

  A função I00 representa a radiação infravermelha que é aplicada em todas as superfícies adjacentes à zona solar. Está função apresenta um valor nulo nas simulações realizadas.

  No CAPSOL a radiação infravermelha proveniente do céu é simulada de uma forma básica e é apenas correta a sua definição em casos onde se estuda uma superfície horizontal.

  Para o cálculo em condições estáticas foi considerada uma temperatura de 0ºC na estação de aquecimento e de 30ºC na estação de arrefecimento.

- **Interior –** apesar de esta zona pretender simular o interior de uma habitação foi definida no CAPSOL como uma zona exterior com temperatura conhecida mas sem volume definido. Esta escolha foi feita para simplificar o processo de cálculo visto neste momento não se pretender estudar em detalhe o ambiente no interior da habitação. A temperatura interior é determinada pela função T04 que assume o valor de 20ºC na estação de aquecimento e 25ºC na estação de arrefecimento.

- **E1, E2 ,E3 –** Estas zonas representam respetivamente o terço inferior, médio e superior da caixa de ar do módulo (ver Fig. 3.9). No CAPSOL estas cavidades foram consideradas zonas interiores baseadas num modelo com fatores de forma (o modelo de cálculo separa as transferências de calor por radiação e convecção), com temperatura desconhecida e cujo volume irá depender da espessura da caixa de ar do módulo em estudo.

3.1.7. Definição de Limites ou *walls*

Os limites ou *walls* como chamadas no manual do CAPSOL são um conjunto de camadas definidas pelo utilizador numa determinada ordem e que constituem um elemento multicamada representativo de uma parede, pavimento, teto, etc.

Como a caixa de ar do módulo é considerada uma zona alvo de cálculo pelo programa CAPSOL é necessário dividir a estrutura do módulo em dois elementos distintos.

Um elemento que separa o clima exterior do ar da caixa de ar do módulo (placagem) e outro elemento que separa a caixa de ar do módulo do espaço interior da habitação (conjunto parede de suporte+isolamento do módulo).

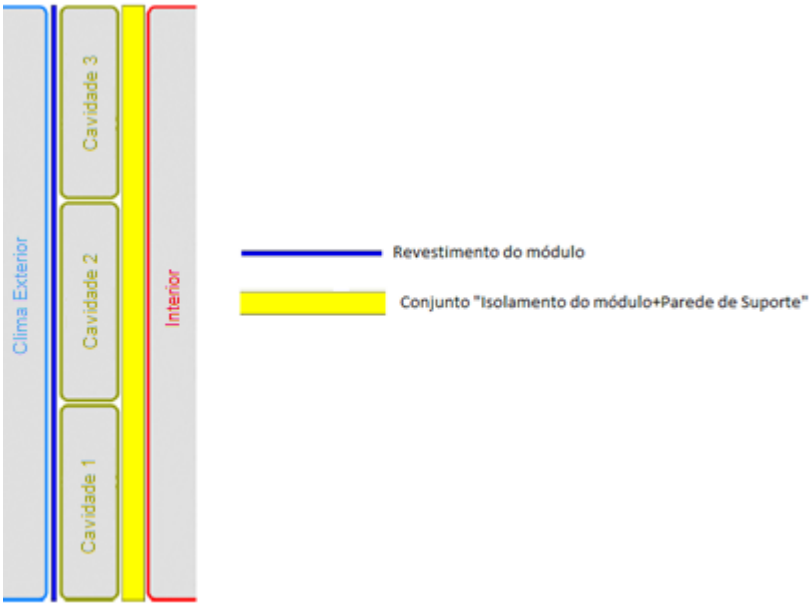


Fig. 3.9 - Esquema da simulação no CAPSOL

3.1.7.1. Características do Revestimento

Rev_Fenolico_escuro.CWT

side1 => side2

No.	Name	Type	Pat	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	Nu [-]	hrb [W/m²K]	τs [-]	side 1 ε1ir [-]	side 1 ρ1s [-]	side 1 α1s [-]	side 2 ε2ir [-]	side 2 ρ2s [-]	side 2 α2s [-]
1	phenolic resin	NORMAL		0.01	0.300	0.033	1300	1700	-	-	0	0.90	0.20	0.80	0.90	0.00	1.00

dtot=0.010 m, Rtot=0.033 m²K/W with [h1=25.0 W/m²K, h2=7.7 W/m²K] U=4.92 W/m²K , g=0.00

Fig. 3.10 - Exemplo de placagem do módulo

Na definição das características do revestimento do módulo em estudo são necessários os seguintes fatores:

- **d** – espessura [m]
- λ - condutibilidade térmica [W/mK]
- **R** – resistência térmica [m^3K/W]
- ρ - densidade [Kg/m^3]

- **c** – calor específico [J/kgK]
- τ_s – coeficiente de transmissividade (0 para materiais opacos)
- ε_{ir} – emissividade
- ρ_s – coeficiente de refletividade
- α_s – coeficiente de absorção solar (dependente da cor do revestimento, 0,4 clara, 0,5 média, 0,8 escura)

De notar que os valores para a emissividade e o coeficiente de reflexão e absorção solar variam de cada lado do revestimento. Para o lado que se encontra virado para a caixa de ar é considerado um valor de 1 para o coeficiente de absorção solar como sugerido em (PHYSIBEL, 2004).

O programa CAPSOL tem integrado uma série de base de dados onde estão disponíveis várias características dos materiais:

- DIN_4108.phm
- IEA_Annex_XIV.phm
- NBN_B62-002.phm
- NEN_1068.phm
- ONORM_B8110-1.phm
- PHYSIBEL.phm
- prEN_ISO_10077-2.phm
- SBR-report_9.phm
- SIA_180.phm

No entanto, os valores para a emissividade, coeficiente de reflexão solar e o coeficiente de absorção solar devem ser definidos pelo utilizador pelo que é necessário pesquisar bases de dados ou estudos externos de forma encontrar estes valores que são de extrema importância e influenciam significativamente o comportamento térmico do revestimento do módulo.

3.1.7.2. Características do elemento interior do Módulo

Como "elemento interior do módulo" entende-se todos os componentes que se encontram após a câmara de ar do módulo e em direção ao ambiente interior.

Apesar de verdadeiramente o elemento interior do módulo apenas ser constituído pelo material de isolamento e eventuais elementos da moldura do módulo, no programa CAPSOL é necessário adicionar a esses elementos também a parede de suporte original da construção em estudo.

Isto porque o elemento que separa a câmara de ar do módulo do ambiente interior é constituído não só pelo módulo em si mas também pela parede original já existente visto não existir nenhum espaço de ar que seja relevante analisar entre estes dois elementos.

Parede Dupla 15+11 xps 8cm.CWT

side1 => side2

No.	Name	Type	Pat	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	Nu [-]	hrb [W/m²K]	τs [-]	side 1 ε1ir [-]	side 1 ρ1s [-]	side 1 α1s [-]	side 2 ε2ir [-]	side 2 ρ2s [-]	side 2 α2s [-]
1	ps extruded	NORMAL		0.08	0.035	2.286	25	1470	-	-	0	0.60	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
2	Reboco	NORMAL		0.012	1.200	0.010	900	850	-	-	0	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
3	brickwork_1200	NORMAL		0.15	0.400	0.375	1200	850	-	-	0	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
4	cavity R=0.18	NORMAL		0.1	0.556	0.180	1.2	1000	-	-	0	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
5	brickwork_1200	NORMAL		0.11	0.400	0.275	1200	850	-	-	0	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
6	Reboco	NORMAL		0.012	1.200	0.010	900	850	-	-	0	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00

dtot=0.464 m, Rtot=3.136 m²K/W with [h1=25.0 W/m²K, h2=7.7 W/m²K] U=0.30 W/m²K , g=0.00

Fig. 3.11 - Exemplo do conjunto "parede de suporte+isolamento do módulo"

As características a definir são iguais às descritas em 3.1.7.1.

A parede original (no exemplo 15+11 sem isolamento na caixa de ar) é definida consoante o caso em estudo. Os parâmetros que interessa estudar como medição do desempenho do isolamento do módulo serão:

- **d** – espessura [m];
- **λ** - condutibilidade térmica [W/mK];
- **ε_{ir}** – emissividade.

3.1.8. Elementos delimitativos das zonas

Após a construção das diferentes paredes como descrito acima, é agora possível usar esses elementos para delimitar as zonas consideradas na simulação.

Walls

Wall	Name	Type	A [m²]	Ori [°]	Slope [°]	Zone1	Side 1 hg1 [W/m²K]	Side 1 hc1 [W/m²K]	Side 1 sr1(tot) [%]	Zone2	Side 2 hg2 [W/m²K]	Side 2 hc2 [W/m²K]	Side 2 sr2(tot) [%]
1	Modulo1	Rev_Fenolico_escuro	1	0	90	Exterior	25	-	-	E1	-	3	0(0)
2	Modulo2	Rev_Fenolico_escuro	1	0	90	Exterior	25	-	-	E2	-	3	0(0)
3	Modulo3	Rev_Fenolico_escuro	1	0	90	Exterior	25	-	-	E3	-	3	0(0)
4	Fachada1	Parede Dupla 15+11 xps 8cm	1	-	-	E1	-	3	0(0)	Interior	7.7	-	-
5	Fachada2	Parede Dupla 15+11 xps 8cm	1	-	-	E2	-	3	0(0)	Interior	7.7	-	-
6	Fachada3	Parede Dupla 15+11 xps 8cm	1	-	-	E3	-	3	0(0)	Interior	7.7	-	-

Fig. 3.12 - Formulário do CAPSOL para definição da separação entre zonas

Como a caixa de ar do módulo foi dividida em três zonas distintas (E1,E2 e E3) de forma a melhor ter em conta a estratificação da temperatura do ar é necessário definir também três paredes distintas (mas com características idênticas) para cada uma das zonas da caixa de ar.

Assim a parede Modulo1, que representa a placagem do módulo, separa a zona Exterior da zona E1 que representa a zona da caixa de ar na base do módulo (ver figura Fig. 3.9).

Para cada parede é necessário definir as seguintes características:

- **A** – Área [m^2];
- **Ori** – Orientação (Sul=0º, Oeste=90º, Norte=180º, Este=-90º);
- **Slope** – Inclinação [º];
- **Side1 e Side2** – as duas zonas que a parede separa;

- **hg** - "global surface heat transfer coeficient" (valor calculado pelo programa) [W/m^{2}K];
- **hc** - Condutância térmica superficial (valor calculado pelo programa) [W/m^{2}K];
- **sr** - Coeficiente de receção solar [%];

3.1.9. CONTROLOS

Controls

No.	Sensor point	θ target	Sens [°C]	Sens [°C]	Purpose	t min ON [min]	t min OFF [min]	Ctrl. type	Ventilation Qm [m³/h]	Ventilation path	Ventilation Ctrl. ΔθON/OFF	Ventilation Δθmin [°C]	Ventilation Ctrl. zone
1	E3	T02	0	0	HEATING	0	0	VENTILATION	30	Exterior▶E1▶...	OFF	-	–
2	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	6.4	Exterior▶E1▶...	ON	0.5	E2
3	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	9.1	Exterior▶E1▶...	ON	1.5	E2
4	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	4.7	Exterior▶E1▶...	ON	2.5	E2
5	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	3.8	Exterior▶E1▶...	ON	3.5	E2
6	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	3.2	Exterior▶E1▶...	ON	4.5	E2
7	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	2.9	Exterior▶E1▶...	ON	5.5	E2
8	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	2.6	Exterior▶E1▶...	ON	6.5	E2
9	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	2.4	Exterior▶E1▶...	ON	7.5	E2
10	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	2.3	Exterior▶E1▶...	ON	8.5	E2
11	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	2.1	Exterior▶E1▶...	ON	9.5	E2
12	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	2	Exterior▶E1▶...	ON	10.5	E2
13	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	1.9	Exterior▶E1▶...	ON	11.5	E2
14	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	1.9	Exterior▶E1▶...	ON	12.5	E2
15	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	1.8	Exterior▶E1▶...	ON	13.5	E2
16	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	1.7	Exterior▶E1▶...	ON	14.5	E2
17	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	1.7	Exterior▶E1▶...	ON	15.5	E2
18	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	1.6	Exterior▶E1▶...	ON	16.5	E2
19	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	1.6	Exterior▶E1▶...	ON	17.5	E2
20	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	1.5	Exterior▶E1▶...	ON	18.5	E2
21	E3	T02	0	0	COOLING	0	0	VENTILATION	1.5	Exterior▶E1▶...	ON	19.5	E2

Fig. 3.13 - Definição de controlos no CAPSOL

Os controlos no CAPSOL permitem a manipulação do comportamento térmico do sistema de forma a ser atingida uma determinada temperatura alvo.

A temperatura alvo é a temperatura que após atingida no ponto de medição irá alterar o estado de um determinado controlo.

Um controlo é ativado ou desativado consoante a temperatura registada num sensor localizado num ponto (superfície de uma parede) ou numa zona (caixa de ar do módulo por exemplo).

Genericamente estão disponíveis três tipos diferentes de controlos no programa CAPSOL:

- ***Ventilation*** - Ventilação mecânica;
- ***Power*** - Fornecimento de energia num determinado ponto dentro de uma zona;
- ***Sunshade*** - Efeito de sombreamento numa determinada parede ou janela (dispositivos de oclusão);

Os dados necessários para definir um controlo são os seguintes:

- ***Sensor point*** – o ponto ou local de controlo da temperatura
- **θ *Target*** – a função que define a temperatura alvo no sensor (20ºC durante o dia por exemplo)
- **Sens + e Sens -** - sensibilidade do controlo, ou seja, qual o grau de variação da temperatura que é detetado pelo controlo;
- ***Purpose*** – se o controlo tem a função de aquecimento ou arrefecimento;
- **T min. ON** – período de tempo mínimo em que o controlo está ativo;

- **T min. OFF** - período de tempo mínimo em que o controlo está desligado;
- ***Ctrl. Type*** – tipo de controlo: *Power* ou *Sunshade* ou *Ventilation*.

3.1.9.1. Controlo de Ventilação

A ventilação pode ser simulada no CAPSOL de duas formas distintas.

Pode ser admitido um caudal de ventilação horário de volume constante ou então simular o caudal provocado pelo efeito chaminé dentro da caixa de ar do módulo.

Estes dois tipos de controlo encontram-se representados na Fig. 3.13.

O **controlo nº 1** representa um controlo de ventilação com um caudal constante de 30 m^3/h. Este tipo de controlo pode ser usado para simular a presença de uma ventoinha no módulo ou outro tipo de dispositivo que garanta uma taxa de renovação horária constante.

Este controlo tem o objetivo de simular o pré-aquecimento do ar pelo que o caminho da ventilação definido no campo *Ventilation path* é o seguinte: Exterior->E1->E2->E3->Interior.

Assim um volume de 30m^3 de ar entra do clima exterior para a caixa de ar do módulo percorrendo-a em altura sendo depois admitido para o interior da habitação.

Este controlo tem a função de aquecimento (*Heating* no campo *Purpose* da Fig. 3.13). Este é um parâmetro importante pois irá determinar o comportamento do controlo. Controlos com função de aquecimento obedecem às seguintes regras:

- Se a temperatura no sensor (*Sensor point*) for inferior à temperatura alvo o controlo é ligado

  Sensor θ < Target θ - downwards sensitivity controlo ligado

- Se a temperatura no sensor for superior à temperatura alvo o controlo é desligado

  Sensor θ> Target θ + upwards sensitivity control desligado

O ponto de monitorização da temperatura (*sensor point*) é a zona E3 da caixa de ar do módulo, correspondendo portanto ao topo do módulo onde a temperatura do ar será maior.

A temperatura alvo é definida pela função T02 (linha azul) representada na figura seguinte.

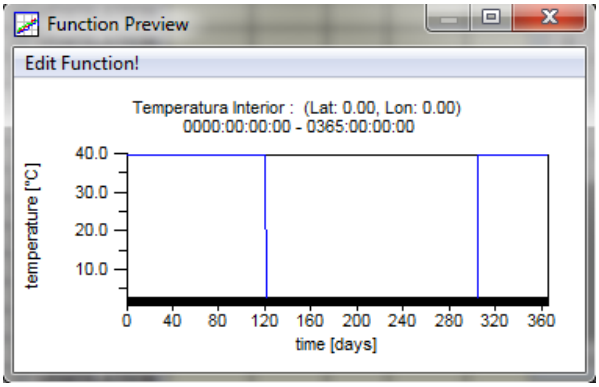


Fig. 3.14 - Função T02, temperatura alvo (Target θ)

Com estes dados verifica-se que no período de aquecimento, ou seja, de novembro (dia 305) abril (dia 120) a temperatura de controlo é de 40ºC e no restante período é de 1ºC (linha azul na Fig. 3.14).

Como o objetivo do controlo nº1 é de aquecimento o CAPSOL realiza o seguinte teste:

Sensor θ< Target θ- downwards sensitivity controlo ligado

Como a temperatura em E3 *(sensor θ*) durante a estação de aquecimento é sempre menor que 40ºC (*Target θ)* o controlo permanece sempre ativo proporcionando um caudal de ventilação constante de $30m^3/h$ durante toda a estação de aquecimento.

Durante a estação de arrefecimento (de maio a outubro, dia 121 a 304) o valor da temperatura de controlo (*Target θ)* muda e assume o valor de 1ºC pelo que a temperatura no sensor nunca é menor que a temperatura de controlo e assim este controlo nunca é ativado nessa estação.

Estes testes realizados pelo CAPSOL em conjunto com os que serão descritos para os controlos de 2 a 21 permitem simular a existência de uma válvula de fecho sazonal operada manualmente.

A definição de outro tipo de controlos pode permitir o estudo de módulos com outro tipo de comportamento como a comutação automática de estados de ventilação consoante a temperatura ou radiação solar incidente entre outros.

Os controlos nº 2 a 21 representam a simulação do efeito chaminé na caixa de ar do módulo.

Estes controlos são implementados de forma a simular o caso em que o módulo apresenta o comportamento de uma fachada ventilada tradicional.

Assim neste caso o caminho de ventilação é o seguinte: Exterior->E1->E2->E3->Exterior

Ou seja, o ar proveniente do clima exterior entra pela base do módulo, percorre o interior da caixa de ar e volta ao clima exterior através de uma abertura na parte superior do módulo.

Estes controlos têm a função de arrefecimento (*Cooling* no campo *Purpose* na janela de definição de controlos do CAPSOL) e comportam-se de forma oposta ao controlo anteriormente descrito.

Controlos com função de arrefecimento obedecem às seguintes regras:

- Se a temperatura no sensor (*Sensor point*) for superior à temperatura alvo o controlo é ligado

  Sensor θ > Target θ upwards sensitivity *control switched on*

- Se a temperatura no sensor for inferior à temperatura alvo o controlo é desligado

  Sensor θ < Target θ - downwards sensitivity *control switched off*

Assim sendo durante a estação de aquecimento estes controlos encontram-se desligados visto que a temperatura em E3 é sempre menor que a temperatura alvo (40ºC) definida na função T02 (ver Fig. 3.14).

Já durante a estação de arrefecimento estes controlos encontram-se ativos visto que a temperatura em E3 é sempre superior à temperatura alvo que nesta estação passa a assumir o valor de 1ºC.

Nestes controlos é definido um novo parâmetro que não foi definido no controlo nº1, a zona de controlo (*Ctrl. Zone* na Fig. 3.13*)*.

A definição desta zona é importante pois para simular o efeito chaminé o CAPSOL irá comparar a diferença de temperatura entre a primeira zona no percurso de ventilação (o Exterior) e a temperatura na zona de controlo (zona E2 correspondente ao meio da caixa de ar do módulo).

Esta diferença de temperatura é representada pelo parâmetro Δθmin e o CAPSOL apenas ativa o controlo se for verificada a seguinte condição:

$$\theta(\text{Exterior}) \leq \theta(\text{E2}) - \Delta\theta\text{min}$$

Exemplo: O controlo nº4 que representa uma ventilação de 4,7 m^3/h apenas se encontra ativo quando existe uma diferença de temperatura de 2,5ºC entre o clima exterior e zona E2 da caixa de ar do módulo, ou seja quando o ar na caixa de ar do módulo se encontra 2,5ºC mais quente que o ar do clima exterior.

Assim sendo, quanto maior for a diferença de temperatura entre o exterior e a caixa de ar maior será o número de controlos que estará ativo e consequentemente maior o caudal de ventilação que irá percorrer a caixa de ar.

Foi escolhida uma precisão de 1ºC para a ativação dos controlos, ou seja, sempre que a diferença temperatura aumenta 1ºC é ativado mais um controlo.

No ponto seguinte será explicado melhor o modelo de ventilação considerado.

3.1.10. Modelo de Ventilação em Excel

O caudal correspondente a cada aumento de temperatura usado nos controlo nº2 a 21 (ver coluna Q_m [m^3/h] na Fig. 3.13) foi calculado usando um modelo de ventilação construído em Excel pela equipa do CAPSOL e que tenta simular de forma simplificada o efeito chaminé numa cavidade.

O cálculo do modelo depende dos seguintes fatores:

- **H -** Altura da cavidade [m];
- **D -** Espessura da Cavidade [m];
- **L -** Largura da Cavidade [m];
- **h_i** - Altura das entradas de ar [m];
- **v_i** - Coeficiente de vazão das entradas de ar.
- As entradas de ar consideram-se localizadas no extremo superior e inferior da face exterior do módulo.

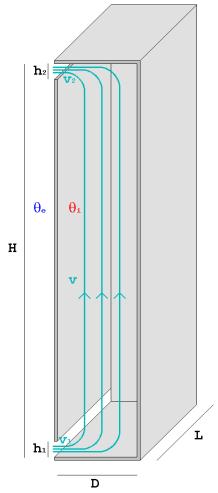


Fig. 3.15 - Esquema usado no modelo de ventilação

Verificou-se que mantendo todos os outros fatores iguais, apenas variando a espessura da caixa de ar não foi verificada uma diferença significativa na taxa de ventilação provocada pelo efeito chaminé.

A espessura da caixa de ar não altera significativamente o volume de ar que entra no módulo nem a respetiva velocidade de entrada ou saída.

Influência porém, a velocidade de circulação no interior da cavidade o que pode provocar uma maior taxa de aquecimento do ar.

Na figura seguinte estão representados os *inputs* (a verde) e os respetivos resultados de cálculo (a laranja) dados pelo modelo de ventilação desenvolvido no Excel.

Espessura da Cavidade	D=	0,01	0,02	0,03	0,05	0,08	0,10
environmental temperature	θ_e =	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
cavity temperature	θ_i =	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
cavity height	H =	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
cavity width	D =	0,010	0,020	0,030	0,050	0,080	0,100
cavity length	L =	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
cavity section	A_c =	0,010	0,020	0,030	0,050	0,080	0,100
cavity volume	V_c =	0,030	0,060	0,090	0,150	0,240	0,300
inlet height	h_1 =	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
inlet surface	A_1 =	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
inlet local friction factor	ξ_1 =	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
outlet height	h_2 =	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
outlet surface	A_2 =	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
outlet local friction factor	ξ_2 =	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
air flow results							
hydraulic diameter	D_h =	0,020	0,039	0,058	0,095	0,148	0,182
pressure difference caused by density difference	Δp =	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
pressure difference caused by friction losses	Δp =	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
air velocity in the cavity	v =	0,13	0,28	0,24	0,16	0,10	0,08
air velocity in the inlet	v_1 =	0,13	0,56	0,73	0,80	0,81	0,82
air velocity in the outlet	v_2 =	0,13	0,56	0,73	0,80	0,81	0,82
air flow	Q_m =	0,001	0,006	0,007	0,008	0,008	0,008
air flow	Q_m =	4,62	20,01	26,13	28,67	29,25	29,34
coefficient b in $Q_m = b * |\Delta\theta|^{0.5}$	b =	0,00057	0,00249	0,00325	0,00356	0,00363	0,00365
ventilation rate	n =	153,97	333,43	290,38	191,14	121,87	97,81
heat flow in case of linear temperature gradient in cavity	$Q_{T\,linear}$ =	15	66	87	95	97	97
heat flow in case of homogeneous temperature in cavity	$Q_{T\,homogenoeus}$ =	8	33	43	47	48	49
friction factor (ASHRAE Fundamentals 1997, 2.8)	f =	0,3926	0,0915	0,0708	0,0658	0,0663	0,0673
Reynolds number	$R_{e,Dh}$ =	163	699	904	973	965	951
flow type		laminar	laminar	laminar	laminar	laminar	laminar

To Capsol

$\Delta\theta_{ie}$ [°C]	ΔQ_m [m^3/h]	ΔQ_m [m^3/h]	ΔQ_m [m^3/h]	ΔQ_m [m^3/h]	ΔQ_m [m^3/h]	ΔQ_m [m^3/h]
0,50	1,0	4,5	5,8	6,4	6,5	6,6
1,50	1,5	6,3	8,3	9,1	9,2	9,3
2,50	0,8	3,3	4,3	4,7	4,8	4,8
3,50	0,6	2,6	3,4	3,8	3,8	3,8
4,50	0,5	2,3	2,9	3,2	3,3	3,3
5,50	0,5	2,0	2,6	2,9	2,9	2,9
6,50	0,4	1,8	2,4	2,6	2,7	2,7
7,50	0,4	1,7	2,2	2,4	2,5	2,5
8,50	0,4	1,6	2,1	2,3	2,3	2,3
9,50	0,3	1,5	2,0	2,1	2,2	2,2

Fig. 3.16 - Modelo de ventilação em Excel

Verifica-se que os ΔQ_m (que representam o acréscimo de caudal de ventilação a importar para os controlos no CAPSOL) se mantêm muito similares para espessuras da caixa de ar entre 3 a 10cm.

De salientar que para Δθ mais pequenos, 0,5ºC e 1,5ºC, os acréscimos de caudal entre a espessura de caixa de ar de 3cm (8,3 m^3/h) e 5cm (9,1 m^3/h) apresentam valores com alguma diferença, no entanto essa diferença não é significativa especialmente tendo-se em conta que este é modelo de ventilação simplificado.

Para valores muito pequenos de espessura da caixa de ar (1cm) a ventilação passa a ser muito reduzida verificando-se incrementos pequenos do caudal com o sucessivo aumento de temperatura havendo assim uma fraca ventilação do módulo.

3.1.10.1. Alterações efetuadas no modelo de ventilação em Excel

É necessário salientar que foram efetuadas algumas alterações ao modo de cálculo proposto pela equipa do CAPSOL.

A definição dos caudais correspondentes a cada aumento de temperatura é calculada pela equação:

$$Q_m = b * |\Delta\theta|^{0,5} \tag{3.1}$$

Onde:

- Q_m – representa o caudal;
- ΔY - representa a diferença de temperatura entre a cavidade o ambiente exterior;
- b – coeficiente dependente das características geométricas da cavidade.

No método original os sucessivos Δθ são calculados através de uma função que efetua o cálculo tendo em conta um "passo" de cálculo, marcado a verde na figura seguinte.

index	$\Delta\theta_{ie}$ [°C]	Q_m [m^3/s]	Q_m [m^3/h]		$\Delta\theta_{ie}$ [°C]	Q_m [m^3/h]	ΔQ_m [m^3/h]
0	0,00	0,0000	0,0		0,00	0,0	
1	0,20	0,0016	5,9		0,10	2,9	2,9
2	1,00	0,0037	13,2		0,60	9,5	6,6
3	2,80	0,0061	22,0		1,90	17,6	8,1
4	6,00	0,0090	32,3		4,40	27,1	9,5
5	11,00	0,0121	43,7		8,50	38,0	10,8
6	18,20	0,0156	56,2		14,60	49,9	12,0
7	28,00	0,0194	69,7		23,10	62,9	13,0
8	40,80	0,0234	84,1		34,40	76,9	14,0
9	57,00	0,0276	99,4		48,90	91,8	14,9
10	77,00	0,0321	115,6		67,00	107,5	15,7
11	101,20	0,0368	132,5		89,10	124,0	16,5
12	130,00	0,0417	150,2		115,60	141,3	17,3
13	163,80	0,0468	168,6		146,90	159,4	18,0
14	203,00	0,0521	187,6		183,40	178,1	18,7
15	248,00	0,0576	207,4		225,50	197,5	19,4
16	299,20	0,0633	227,8		273,60	217,6	20,1
17	357,00	0,0691	248,8		328,10	238,3	20,7
18	421,80	0,0751	270,5		389,40	259,7	21,3
19	494,00	0,0813	292,7		457,90	281,6	21,9
20	574,00	0,0876	315,5		534,00	304,1	22,5

Fig. 3.17 - Folha de cálculo original modelo ventilação em Excel

Os dados a importar para o CAPSOL, e que definem os sucessivos controlos (ver Fig. 3.13), encontram-se marcados a laranja.

Este método de cálculo foi construído pela equipa do CAPSOL idealizando uma fachada ventilada transparente onde o gradiente térmico entre a caixa de ar e o clima exterior pode assumir valores

elevados. Assim a progressão de temperaturas obtidas por este método (0,1 – 0,6 – 1,9 – 4,4 – 8,5 – 14,6 ºC, etc) pode ser considerado adequado.

No entanto, no caso de uma fachada opaca (como a que é objeto nesta dissertação), a diferença de temperatura entre o clima exterior e a caixa de ar não será tão acentuada pelo que se considerou útil definir a sensibilidade dos controlos manualmente não usando a função por "passos" explicada anteriormente.

O processo de cálculo é o mesmo, apenas os valores de $\Delta\theta$ foram definidos manualmente e não através de uma função.

$\Delta\theta_{ie}$ [°C]	Q_m [m^3/h]		$\Delta\theta_{ie}$ [°C]	Q_m [m^3/h]	ΔQ_m [m^3/h]
0	0,0		0,0	0,0	
1	13,2		0,50	6,6	6,6
2	18,6		1,50	15,9	9,3
3	22,8		2,50	20,7	4,8
4	26,3		3,50	24,6	3,9
5	29,4		4,50	27,9	3,3
6	32,3		5,50	30,9	3,0
7	34,8		6,50	33,6	2,7
8	37,2		7,50	36,0	2,5
9	39,5		8,50	38,4	2,3
10	41,6		9,50	40,6	2,2
11	43,7		10,50	42,7	2,1
12	45,6		11,50	44,7	2,0
13	47,5		12,50	46,6	1,9
14	49,3		13,50	48,4	1,8
15	51,0		14,50	50,1	1,8
16	52,7		15,50	51,8	1,7
17	54,3		16,50	53,5	1,6
18	55,9		17,50	55,1	1,6
19	57,4		18,50	56,6	1,6
20	58,9		19,50	58,2	1,5
21	60,4		20,50	59,6	1,5

Fig. 3.18 - Folha de cálculo modificada modelo ventilação em Excel

Como se pode verificar um incremento de temperatura de 1ºC foi definido para cada controlo.

Ou seja, por cada grau de diferença entre a temperatura exterior e a temperatura na caixa de ar do módulo um controlo é ativado.

A sensibilidade dos controlos pode ser alterada, podendo-se considerar uma diferença de temperatura de 0,5ºC por exemplo.

3.1.11. Relatório Alfanumérico CAPSOL

O relatório elaborado pelo programa CAPSOL trata-se de um ficheiro de texto onde se encontram registados os valores horários dos diferentes outputs pedidos ao programa resultantes das simulações efetuadas.

Alphanumeric Output

No.	Type	Location 1	Location 2	Function Type	Func. Par.	Frequency	Freq. Par.	Scope Start [h]	Scope End [h]	Scope Start [day]	Scope End [day]	Format	Separator	ON
1	month-day			nihil	-	hour	-	0	24	1	7	1-0	/	☑
2	month			nihil	-	hour	-	0	24	1	7	1-0	/	☑
3	year			nihil	-	hour	-	0	24	1	7	1-0	tab	☑
4	hour			nihil	-	hour	-	0	24	1	7	1-0	:	☑
5	min			nihil	-	hour	-	0	24	1	7	1-0	tab	☑
6	θ	Exterior		mean	-	hour	-	0	24	1	7	2-1	tab	☑
7	θ	Interior		mean	-	hour	-	0	24	1	7	2-1	tab	☑
8	θ	E1		mean	-	hour	-	0	24	1	7	2-1	tab	☑
9	θ	E2		mean	-	hour	-	0	24	1	7	2-1	tab	☑
10	θ	E3		mean	-	hour	-	0	24	1	7	2-1	tab	☑
11	θ	Revestimento Frente		mean	-	hour	-	0	24	1	7	2-1	tab	☑
12	θ	Revestimento Tardoz		mean	-	hour	-	0	24	1	7	2-1	tab	☑
13	Q conduct	Interior	Fachada1	integral	-	hour	-	0	24	1	7	2-2	tab	☑
14	Q conduct	Interior	Fachada2	integral	-	hour	-	0	24	1	7	2-2	tab	☑
15	Q conduct	Interior	Fachada3	integral	-	hour	-	0	24	1	7	2-2	tab	☑
16	Qs total	Modulo1		integral	-	hour	-	0	24	1	7	2-2	tab	☑
17	Qs total	Modulo2		integral	-	hour	-	0	24	1	7	2-2	tab	☑
18	Qs total	Modulo3		integral	-	hour	-	0	24	1	7	2-2	tab	☑
19	Q vent	E3	Interior	integral	-	hour	-	0	24	1	7	2-2	tab	☑
20	Qm vent	Exterior	E1	mean	-	hour	-	0	24	1	7	2-2	tab	☑
21	switch	Ctrl. 1		nihil	-	hour	-	0	24	1	7	1-0	newline	☑

Fig. 3.19 - Definição dos outputs a registar no relatório do CAPSOL

Os parâmetros calculados e registados para cada hora foram os seguintes:

- **Data –** período em que foi efetuada cada medição, formato dd/mm/aaaa hh:mm;
- **θExterior** – temperatura média do clima exterior [°C];
- **θInterior** – temperatura média no espaço interior [°C];
- **θE1, θE2, θE3** – temperatura média a diferentes níveis da caixa de ar do módulo [°C];
- **θRevestimento Frente/Tardoz** – temperatura média da superfície das duas faces do revestimento do módulo [°C];
- **Qconduct** – Somatório da quantidade de calor transmitida por condução do interior do espaço até a superfície exterior da parede de suporte [W];
- **Qconvect** – Somatório da quantidade de calor transmitida por convecção no interior da caixa de ar do módulo [W];
- **Qradiative** – Somatório da quantidade de calor transmitida por radiação entre as superfícies no interior da caixa de ar [W];
- **Qs total –** Somatório da radiação solar total (direta+difusa+refletida do solo) recebida pelo revestimento do módulo [W];
- **Q vent –** Somatório da quantidade de calor transmitido por ventilação do espaço E3 para o interior [W];
- **Qm vent –** caudal de ventilação médio que entra para o espaço E1 proveniente do clima exterior [m^3/h];
- **Switch –** valor que varia entre 0 e 1 e que indica qual a configuração da ventilação do módulo num dado momento. Se o módulo se encontra com uma configuração de fachada ventilada tradicional ou se se encontra na configuração de pré-aquecimento do ar de ventilação, por exemplo.

4 - Base de Dados Access

4.1. DESCRIÇÃO

Devido ao grande volume de dados gerados pelo programa CAPSOL, especialmente quando se efetuam simulações com o período de um ano, o autor criou uma base de dados em Access que permite não só o armazenamento dessa grande quantidade de dados, ligá-los às características da respetiva simulação mas também permite manipular e calcular novos dados relevantes à investigação.

Assim, os dados provenientes do relatório CAPSOL correspondem aos dados em bruto que serão manipulados e analisados na base de dados Access de forma a extrair deles a informação requerida num formato que facilite a sua interpretação.

Os dados são armazenados em tabelas no Access mas a sua leitura e análise é realizada através de formulários que tornam a apresentação da informação mais esteticamente agradável e de melhor interpretação.

Conforme o avançar da investigação verificou-se que a capacidade de análise de dados do Access não eram suficientes para a análise em curso pelo que se elaborou também uma folha de cálculo em Excel complementar à base de dados e descrita em maior pormenor no ponto 4.8 adiante.

A base de dados desenvolvida funciona como repositório dos dados obtidos através do programa CAPSOL, é possível consultar todas as informações relativas a simulações já realizadas. No entanto, caso se deseje analisar um caso ainda não simulado será necessário proceder à simulação no CAPSOL e importar de seguida os dados para a base de dados em Access. Assim, a base de dados pode ser considerada fixa e não dinâmica visto por limitações do CAPSOL não ser possível criar e correr novas simulações a partir do interface da base de dados no Access.

De seguida serão descritos os diferentes tipos de formulários guardados e disponíveis na base de dados Access.

4.2. ZONA CLIMÁTICA

ZonaClimatica

ID	Zona Climatica	Inicio EA	Fim EA	Graus-Dias
1	Porto	01-11-2001	30-04-2001	1753
2	Bragança	01-10-2001	31-05-2001	2591
3	Faro	01-11-2001	30-04-2001	1198

Fig. 4.1 - Formulário zona climática

Neste formulário estão armazenados dados relativos às diferentes zonas climáticas estudadas, nomeadamente:

- **Inicio EA** – data de início da estação de aquecimento
- **Fim EA** – data de fim da estação de aquecimento
- **Graus-Dias** – o número de graus-dias foi calculado pelo somatório das diferenças positivas entre a temperatura base (20ºC) e a temperatura do clima exterior registada nos ficheiros climáticos usados no programa CAPSOL durante o período compreendido entre as datas de início e fim da estação de aquecimento.

4.3. PAREDE DE SUPORTE

Suporte

ID	Tipo de Parede	USuporte
1	Dupla 15+11 s/iso	0,9
2	Dupla 11+11 s/iso	1,08
3	Dupla 15+11 c/iso	0,53

Fig. 4.2 - Formulário Parede de suporte

Neste formulário estão contidas as informações referentes à parede de suporte usada na simulação, ou seja, à parede original presente caso se trate de uma reabilitação, por exemplo.

- **Usuporte** – coeficiente de transmissão térmica [W/m^{2}K]

4.4. REVESTIMENTO

Revestimento

ID	Material	Espessura	Emissividade	Calor Especifico
1	Aluminio	0,15	0,18	880
2	Aço Cortene	0,5	0,8	480
3	Ceramico	1	0,85	840
4	Fenólico	1	0,9	1700
5	Betão Polimero	3	0,92	1000
6	Madeira HDF	2	0,86	2340

Fig. 4.3 - Formulário do revestimento do módulo

Neste formulário são inseridas as diferentes opções disponíveis para o material a usar na placagem do módulo.

- **Espessura –** espessura do revestimento [cm]
- **Emissividade** – emissividade do revestimento
- **Calor especifico** – [J/KgK]

4.5. ISOLAMENTO

Isolamento

ID	Material	Espessura	Emissividade	Condutividade	UIsolamento
1	XPS	3	0,6	0,035	1,167
2	XPS	6	0,6	0,035	0,583
3	XPS	8	0,6	0,035	0,438
4	XPS low e	3	0,03	0,035	1,167
5	XPS low e	6	0,03	0,035	0,583
6	XPS low e	8	0,03	0,035	0,438

Fig. 4.4 - Formulário Isolamento

Este formulário contem a informação relativa aos isolamentos disponíveis para ser usados nas simulações.

- **Espessura** – [cm]
- **Condutividade** - [W/mK]
- **UIsolamento** - coeficiente de transmissão térmica [W/m^{2}K]

4.6. Modelo do Módulo

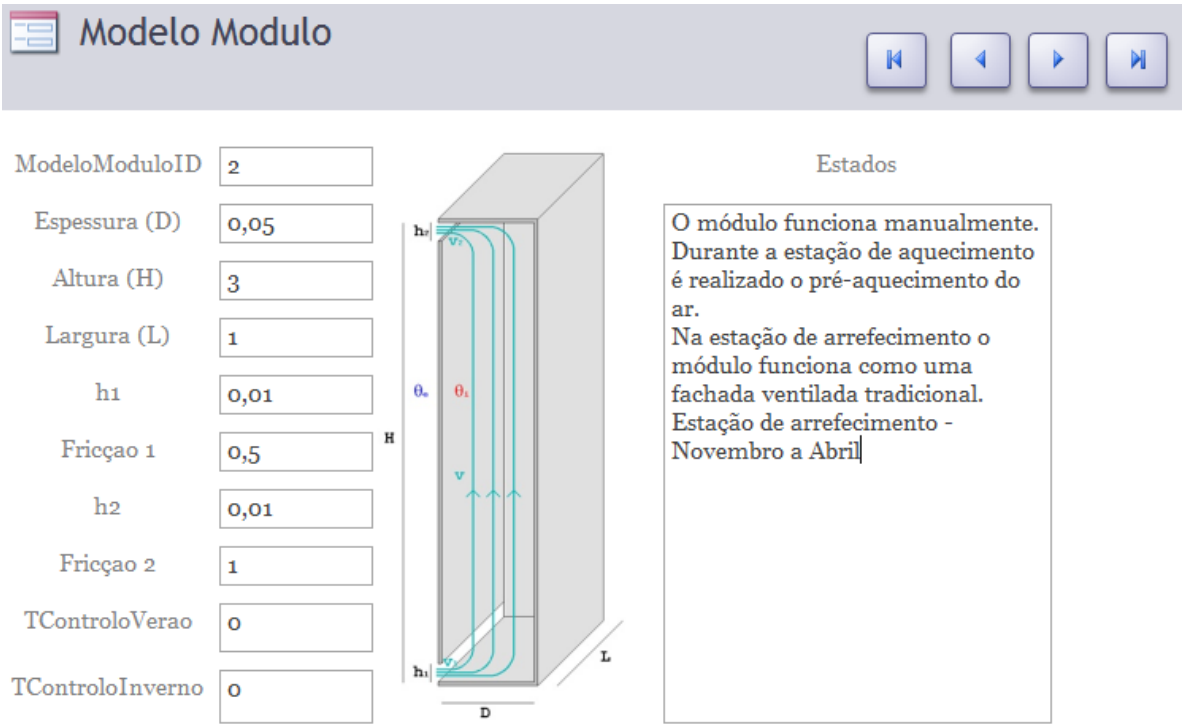


Fig. 4.5 - Formulário modelo de módulo

Neste formulário estão descritos os diferentes tipos de módulo simulados. São apresentadas as suas características geométricas bem como uma breve descrição do seu funcionamento.

4.7. Simulações

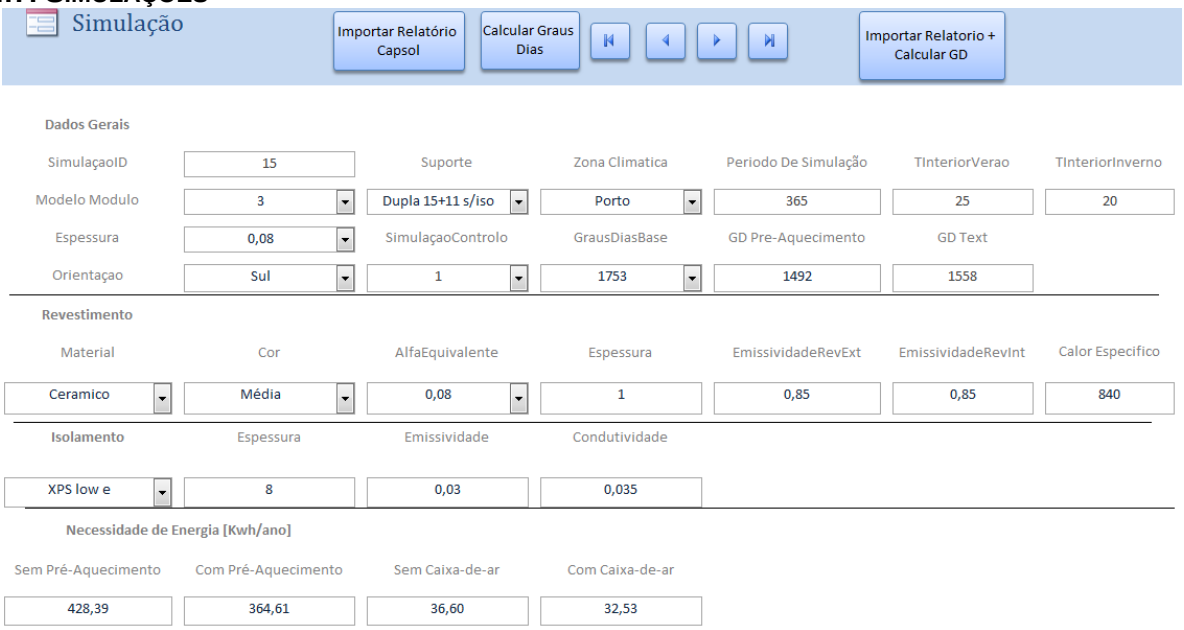


Fig. 4.6 - Formulário Simulação

Este formulário descreve as condições e quais os parâmetros usados em cada uma das simulações.

Cada simulação tem um número identificador único e no seu formulário estão descritas as condições em que a simulação foi realizada no programa CAPSOL. Em anexo a este formulário estão também os dados do relatório alfanumérico elaborado pelo CAPSOL referentes a esta simulação.

Neste formulário encontramos agrupados parâmetros já descritos nos formulários anteriores mas também são apresentados novos dados relativos a cada simulação e que resultam de cálculos efetuados:

- **GD Pré-Aquecimento –** os Graus-Dias com Pré-aquecimento são calculados através do somatório das diferenças positivas entre a temperatura base (20ºC) e a temperatura do espaço E3 (zona superior) da caixa de ar do módulo durante a estação de aquecimento. Este valor permite comparar a necessidade de aquecimento na situação em que o ar é admitido diretamente do exterior ou em que é pré-aquecido na caixa de ar antes de ser admitido para o interior da habitação;
- **GD Text –** os Graus-Dias referentes à temperatura do ambiente exterior são calculados através do somatório das diferenças positivas entre a temperatura base (20ºC) e a temperatura do espaço E2 (zona média) da caixa de ar do módulo. Este valor permite ter em conta o efeito da criação de um microclima na caixa de ar dó módulo que é geralmente mais quente que aquele verificado no clima exterior.
- **Perdas térmicas –** estimativa da energia necessária para efeitos de aquecimento (kWh/ano). São calculados quatro valores distintos**:**
    - **Sem Pré-aquecimento –** perdas térmicas caso o ar de ventilação seja admitido diretamente do exterior. Q_v=0,34*Q*GrausDiasBase*0,024;
    - **Com Pré-Aquecimento** – perdas térmicas caso o ar admitido seja sujeito a pré-aquecimento na caixa de ar do módulo. Q_v=0,34*Q*GDPreAquecimento*0,024;
    - **Sem caixa de ar** – perdas térmicas devido a perda por condução através da envolvente exterior caso não seja considerada o efeito da caixa de ar do módulo. Q_{ext}=0,024*ΣU*A*GrausDiasBase;
    - **Com caixa de ar –** perdas térmicas devido a perda por condução através da envolvente exterior caso seja considerada o efeito da caixa de ar do módulo. Q_{ext}=0,024*ΣU*A*GDText;

4.8. FOLHA DE CÁLCULO EXCEL

Como já foi referido anteriormente o Access revelou-se uma ferramenta indispensável e extremamente eficaz na organização e armazenamento das elevadas quantidades de dados em bruto obtidos pelas simulações realizadas no CAPSOL.

No entanto, a sua capacidade para análise e organização dessa mesma informação revelou-se limitada e aquém das necessidades do autor pelo que foi criada uma folha de cálculo em Excel desenhada para funcionar de forma complementar à base de dados.

Uma parte da folha de cálculo encontra-se representada na figura seguinte.

Fig. 4.7 - Folha de cálculo Excel elaborada pelo autor

Esta folha de cálculo encontra-se ligada à base de dados Access permitindo a análise e representação gráfica de todas as características consideradas relevantes para o estudo em questão.

Trata-se de uma folha de cálculo dinâmica onde diferentes filtros podem ser aplicados em tempo real simultaneamente a todos os gráficos nela representados de forma a ser visualizada a informação pretendida bem como ser possível a rápida comparação entre diferentes simulações.

Os filtros encontram-se localizados em caixas na parte superior da folha bem como ao longo da sua margem esquerda e incluem parâmetros como o material de placagem, a sua cor, a orientação do módulo, o período do dia bem como do ano em análise, entre outros.

Todos os gráficos presentes no capítulo 5 foram obtidos através desta ferramenta.

5 - Estudo de sensibilidade

5.1. INTRODUÇÃO

Todos os módulos e suas variantes foram simulados para um período de um ano tendo sido registados dados horários referentes a cada simulação.

No entanto, na análise que se segue optou-se por se representar os dados obtidos em dois períodos temporais distintos.

Um período denominado de período de aquecimento consiste nas medições obtidas nos meses de novembro, dezembro e janeiro. Este período permite avaliar o desempenho do módulo em condições climatéricas típicas da estação de aquecimento.

Já o período compreendido entre os meses de junho, julho e agosto denominado período de arrefecimento irá permitir avaliar o comportamento térmico dos módulos em condições típicas da estação de arrefecimento.

Todos os valores apresentados são relativos a um módulo com 1 metro de largura e 3 metros de altura.

5.2. MATERIAL DE PLACAGEM

5.2.1. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

No quadro seguinte estão resumidas as condições de simulação realizadas. O parâmetro variável nas várias simulações efetuadas encontra-se assinalado a sombreado. Variando-se apenas um parâmetro em cada simulação mantendo-se todos os outros parâmetros constantes permite medir qual a influência do parâmetro variável no desempenho do módulo.

Tabela 5.1 - Condições de simulação, material de placagem

Condições de simulação	
Parâmetro	**Valor**
Modelo do módulo	3
Espessura da caixa de ar	0,08 m
Material de Revestimento	Alumínio, betão, madeira, cerâmico, fenólico
Cor do revestimento	Escura
Isolamento	XPS 8cm
Parede de Suporte	Dupla 15+11 s/iso
Orientação	Sul
Zona Climática	Porto
Graus-Dias Base	1753

5.2.2. ANÁLISE

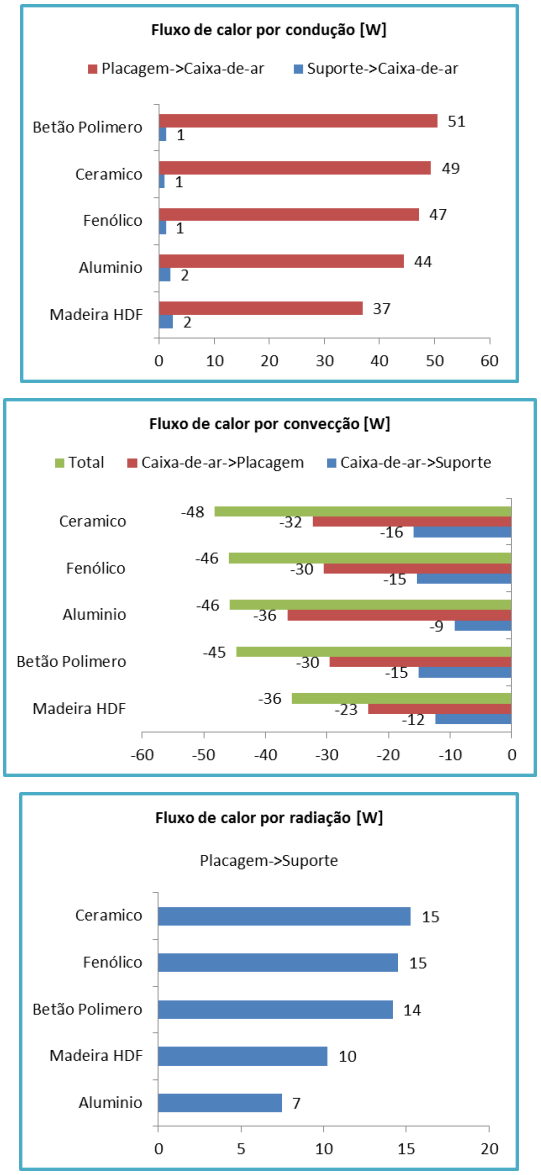


Fig. 5.1 - Fluxo de calor por condução, convecção e radiação durante o período de aquecimento, 9-18h

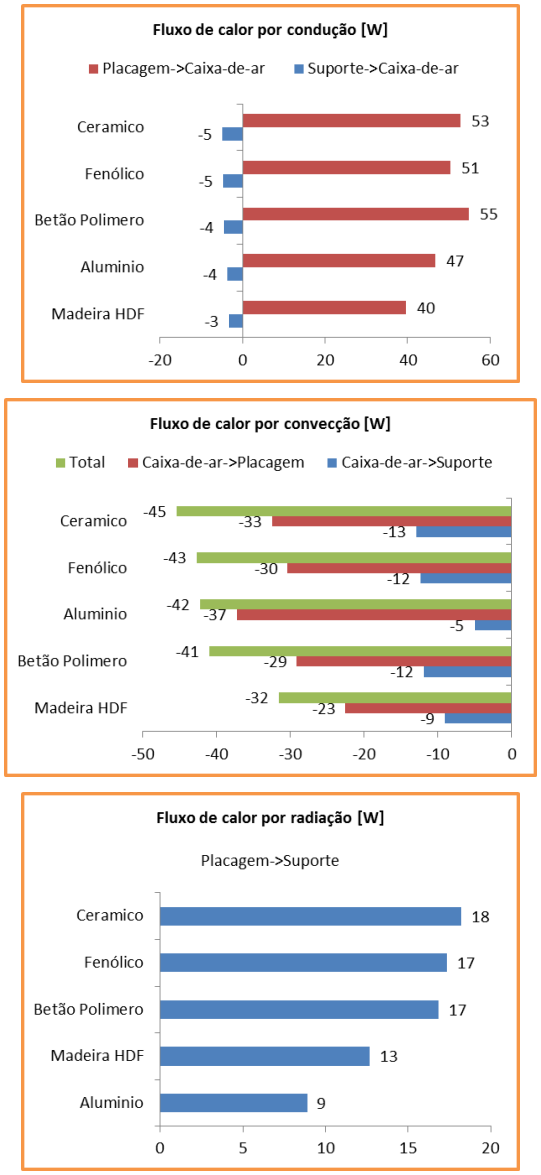


Fig. 5.2 - Fluxo de calor por condução, convecção e radiação durante o período arrefecimento, 9-18h

Nota: nos gráficos referentes ao fluxo de calor por condução a legenda Placagem->caixa de ar visa clarificar qual o sentido do fluxo, ou seja, caso o valor seja positivo o fluxo de calor atravessa a placagem em sentido à caixa de ar do módulo. Caso o valor seja negativo o fluxo de calor verifica-se na placagem no sentido ao clima exterior. O mesmo se verifica na legenda relativa ao suporte. Não se trata, obviamente, da transmissão térmica por condução entre um sólido e um gás (o ar da caixa de ar).

Os diferentes materiais de placagem testados possuem desempenhos semelhantes entre si a nível de aumento de temperatura na caixa de ar apresentando, no entanto, a madeira um desempenho inferior (menos 1ºC de aumento de temperatura) como é visível na figura seguinte.

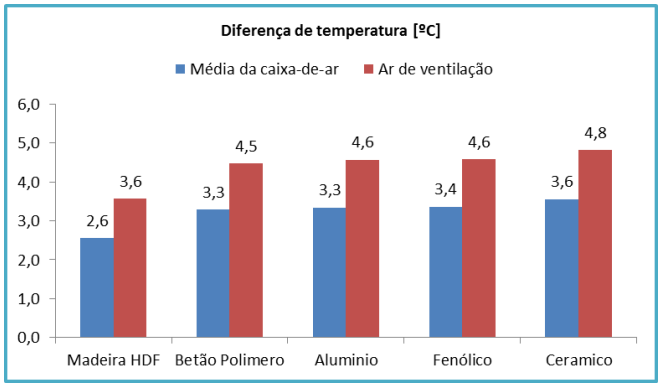


Fig. 5.3 - Diferença de temperatura média em relação ao clima exterior durante o período de aquecimento, 9-18h

É interessante verificar que são várias as características dos materiais que influenciam o seu desempenho.

Em termos de pré-aquecimento do ar a capacidade de condução do material de placagem é importante pois permite que uma maior quantidade de energia, proveniente do clima exterior, atravesse o material de placagem sendo depois dissipada na caixa de ar.

Essa dissipação ocorre de duas formas, por convecção e radiação.

São assim também importantes a emissividade do material e a sua capacidade de transmitir energia de forma convectiva para o ar da caixa de ar de forma a permitir assim um maior aumento de temperatura.

Todas estas trocas energéticas são complexas de difícil análise sendo necessário uma perspetiva global das várias trocas realizadas e os seus efeitos cumulativos.

De facto, não basta o material de placagem ser um excelente condutor para garantir o melhor desempenho no pré-aquecimento do ar de ventilação e da criação do melhor microclima na caixa de ar.

Nas simulações realizadas é a placagem em betão polímero que apresenta melhores características condutivas como pode ser observado no gráfico da Fig. 5.1 relativo à condução.

No entanto, é a placagem em cerâmico que permite uma maior troca de calor por convecção na caixa de ar do módulo.

Sendo que a placagem em betão é apenas a quarta melhor dos cinco revestimentos simulados, como se pode verificar no gráfico referente à convecção da Fig. 5.1.

Isto deve-se ao facto de que as trocas de calor por convecção na caixa de ar do módulo se deverem não só à energia proveniente da placagem mas também da camada de isolamento do módulo que também se encontra em contacto com o ar da caixa de ar.

Assim sendo, a otimização do desempenho do módulo para o pré-aquecimento do ar, depende da temperatura e da energia transmitida pela placagem e também da temperatura e energia transmitida pela camada isolante do módulo.

A camada de isolamento do módulo encontra-se em contacto tanto com o ar da caixa de ar como também com a parede de suporte original do edifício.

Nas simulações realizadas as condições interiores do edifício foram consideradas constantes ao longo do tempo bem como as características do material de isolamento pelo que a temperatura da face do

isolamento voltada para a caixa de ar irá ser dependente das características do material da placagem, do seu efeito na temperatura do ar da caixa de ar e também da temperatura exterior.

O material de placagem afeta a temperatura do isolamento de duas formas distintas.

Influenciando a temperatura do ar influencia também a quantidade de calor transmitido através do isolamento, no entanto, é preciso não esquecer que existem também trocas radiativas entre a placagem e o isolamento do módulo.

Assim sendo, quanto maior energia for transmitida por radiação pela placagem maior será o aumento de temperatura do isolamento e consequentemente maiores as suas trocas térmicas com o ar da caixa de ar.

No entanto, quanto maiores forem as trocas radiativas da placagem para o isolamento menor serão as trocas da placagem com o ar da caixa de ar por convecção. Mais uma vez se verifica que estes fenómenos são complexos e dependentes uns dos outros sendo necessária uma análise cuidada e ponderada tanto de cada fenómeno em si como da sua influência em sistema.

Como é visível no gráfico da Fig. 5.1 referente à radiação a placagem em material cerâmico e fenólico são aquelas que permitem uma maior troca radiativa entre a placagem e o isolamento promovendo assim o seu aquecimento por radiação.

Já a madeira e o alumínio são os materiais que menos trocas radiativas efetuam com o isolamento.

No caso do alumínio é interessante verificar que apesar de ser o material que apresenta menores trocas radiativas é aquele que apresenta maiores trocas por convecção como é visível no gráfico da Fig. 5.2 referente à convecção.

Assim, neste caso o alumínio não contribui tanto por radiação para o aumento da temperatura do isolamento. No entanto, como as trocas radiativas são menores as trocas convectivas são maiores visto a energia que chega à face interior da placagem por condução ter de ser dissipada.

Como as trocas convectivas são superiores é também superior a temperatura do ar na caixa de ar e consequentemente é também superior a superfície do isolamento como pode ser verificado na figura seguinte que representa as temperaturas em vários pontos de cada módulo simulado.

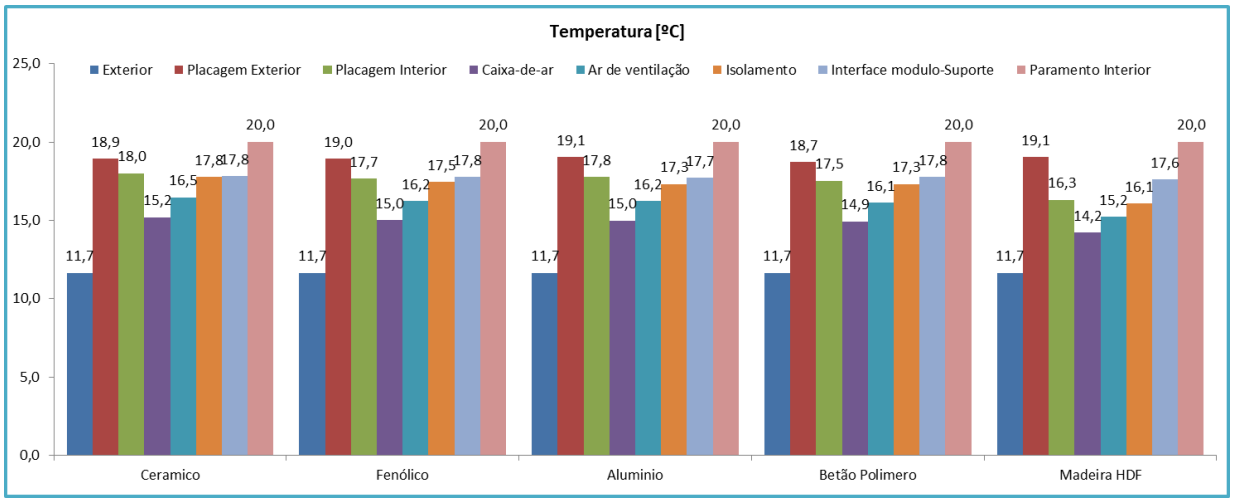


Fig. 5.4 – Temperaturas médias durante o período de aquecimento no intervalo 9-18h em vários pontos dos módulos, módulos apresentados por decrescente temperatura na caixa de ar.

Analisando o gráfico da Fig. 5.4 verifica-se que é a placagem em material cerâmico que potência um melhor pré-aquecimento do ar de ventilação bem como uma maior temperatura média do ar na caixa de ar do módulo.

A placagem de madeira é aquela que apresenta um pior desempenho devido à sua fraca capacidade condutora não sendo no entanto a diferença muito significativa.

Durante a estação de arrefecimento o comportamento dos diferentes materiais de placagem testados é similar ao verificado na estação de aquecimento.

De salientar, no entanto, que a diferença de temperatura verificada entre o clima exterior e o ar na caixa de ar é superior durante a estação de arrefecimento como pode ser verificado na figura seguinte.

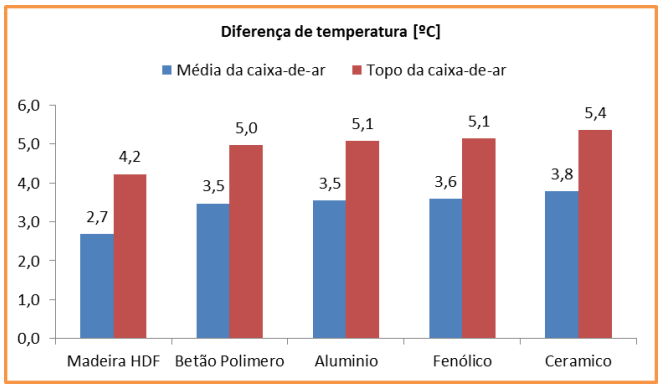


Fig. 5.5 - Diferença de temperatura média na caixa de ar em relação ao clima exterior durante o período de arrefecimento, 9-18h

Convém relembrar que durante a estação de arrefecimento o módulo se comporta como uma fachada ventilada tradicional não existindo pré-aquecimento do ar de ventilação e sendo que a circulação do ar dentro da caixa de ar se deve exclusivamente ao efeito chaminé.

Assim sendo, o caudal existente na caixa de ar depende do desempenho do módulo e é diferente consoante o material utilizado na placagem como é visível no gráfico seguinte onde se encontra representado o caudal médio calculado na caixa de ar dos diferentes módulos.

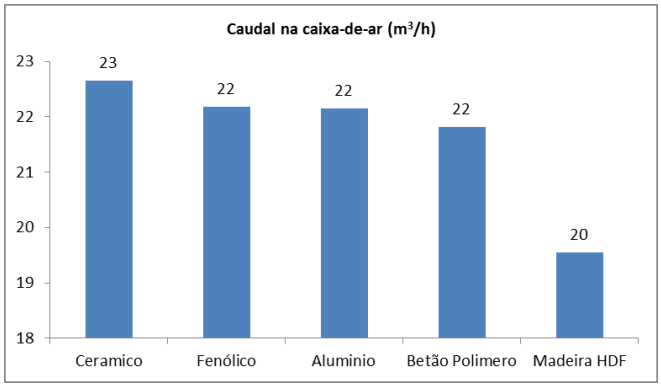


Fig. 5.6 - Caudal médio na caixa de ar, período de arrefecimento 9-18h

Esta diferença na taxa de ventilação dos módulos irá também afetar o seu comportamento térmico.

Antes de se proceder a uma análise mais pormenorizada do comportamento térmico dos vários módulos é útil quantificar as perdas térmicas ocorridas na situação original antes da colocação de qualquer módulo.

Para isso simulou-se a parede de suporte do edifício (parede dupla 15+11 sem isolamento na caixa de ar), nas mesmas condições consideradas simulações com o módulo presente.

Os resultados das trocas térmicas entre a fachada e o clima exterior encontram-se representados no seguinte gráfico.

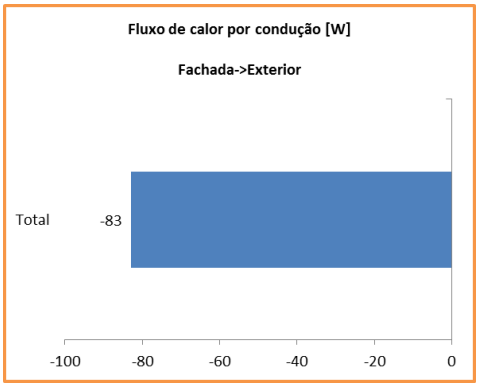


Fig. 5.7 - Fluxo de calor por condução pela parede original sem módulo durante o período de arrefecimento, 9-18h

Verifica-se assim que no período entre as 9:00 e as 18:00 horas durante os meses de junho, julho e agosto uma média horária de ganho de calor entre a parede e o clima exterior de 83 W.

Ou seja, a envolvente está a ter um ganho térmico horário do de 83W.

Este valor é importante pois servirá de comparação com aquele verificado após a instalação dos diversos módulos.

No gráfico da Fig. 5.2 encontram-se representados os fluxos de calor por condução da placagem (a vermelho) e da camada isolante (a azul) para a caixa de ar do módulo.

Verifica-se que com a instalação do módulo as trocas térmicas verificadas pela parede de suporte diminuem consideravelmente.

De facto, entre a camada isolante do módulo e a caixa de ar verifica-se, em média, um fluxo de calor por condução de 4W em direção ao interior da habitação.

Este valor é já por si muito interessante e representa um grande aumento de desempenho face aos 83 W calculados na situação original sem módulo.

Este facto é melhor compreendido quando se compara as temperaturas calculadas em vários pontos do módulo e da parede de suporte.

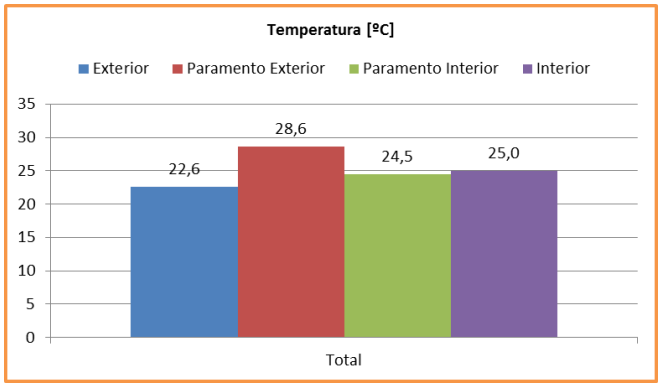


Fig. 5.8 - Temperaturas em vários pontos da parede de suporte original, simulação sem a presença de módulo durante o período de arrefecimento, 9-18h

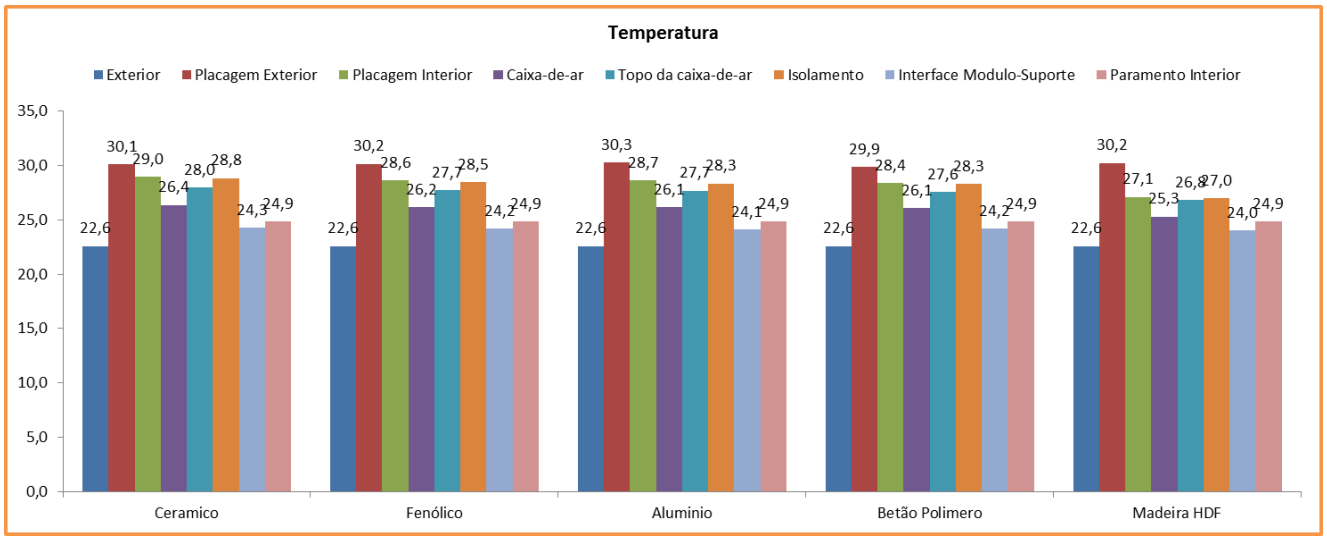


Fig. 5.9 - Temperaturas médias durante o período de arrefecimento no intervalo 9-18h em vários pontos dos módulos, módulos apresentados por decrescente temperatura na caixa de ar.

Na situação original, sem a presença do módulo, verifica-se uma temperatura média da superfície da parede de suporte de 28,6ºC.

Após a instalação do módulo essa temperatura baixa para cerca de 24ºC.

Esta diminuição de temperatura, e consequentemente dos ganhos térmicos, deve-se não só à proteção contra as radiações solares proporcionadas pela placagem do módulo mas também pela presença da camada de isolamento térmico que permite, apesar de a temperatura na caixa de ar ser superior à do clima exterior, um menor fluxo de calor na parede de suporte em direção ao interior.

Durante a estação de arrefecimento interessa minimizar os ganhos térmicos pela fachada pelo que a análise é inversa aquela realizada durante a estação de aquecimento.

Interessa identificar quais as características que permitem uma maior diminuição dos ganhos pela envolvente para depois pesar essas características e benefícios com aqueles relevantes para a estação de aquecimento.

Assim sendo, como é visível no gráfico da figura Fig. 5.2, é a placagem em madeira que permite uma menor temperatura do ar na caixa de ar (2,7ºC) e o menor fluxo de calor na direção da parede de suporte (3W). A placagem em cerâmico, que é a mais vantajosa durante a estação de aquecimento, apresenta-se agora como aquele com pior desempenho na estação de arrefecimento pois promove

maiores ganhos térmicos pela envolvente visto ser aquela aumenta a temperatura na caixa de ar (3,8ºC) bem como o fluxo de calor na direção da parede de suporte (5W).

Durante a estação de arrefecimento as trocas radiativas apresentam ainda maior relevo visto a radiação solar apresentar valores mais elevados face à estação de aquecimento.
Mais uma vez se verifica que a placagem em alumínio é aquela que permite uma menor troca de calor por radiação entre a placagem e a parede de suporte.
Esta é uma característica vantajosa do alumínio que pode ser explorada pela adição de películas de baixa emissividade nas superfícies voltadas para a caixa de ar, este será um tema abordado em simulações adiante.

5.2.3. CONCLUSÃO

É importante obter uma perspetiva global do funcionamento de cada módulo durante o período de aquecimento bem como de arrefecimento.

Para isso somou-se, para todo o período de aquecimento, todos os valores horários do fluxo de calor registado na camada de isolamento do módulo bem como as perdas térmicas totais resultante da ventilação.

De notar que somando os valores horários do fluxo de calor por condução através da camada de isolamento tem-se em conta tantos os valores positivos (perdas) bem como os negativos (ganhos) sendo feito assim um balanço energético durante o período considerado.

Já no período de arrefecimento apenas se somou os valores registados do fluxo de calor na camada de isolamento no período das 9h as 18h. Tomou-se esta decisão visto durante o período de arrefecimento ser durante o dia que o comportamento do módulo é deveras importante do ponto de vista de diminuição dos ganhos térmicos pela envolvente.

Para além disso, caso se tivesse tido em conta todo o período as diferenças verificadas ao longo do dia entre as diversas simulações seriam diluídas entre os valores verificados durante a noite altura em que os diversos módulos apresentam comportamento similar.

Relembre-se mais uma vez que durante o período de arrefecimento a ventilação é realizada diretamente do ar exterior não tendo assim os módulos influência neste fator.

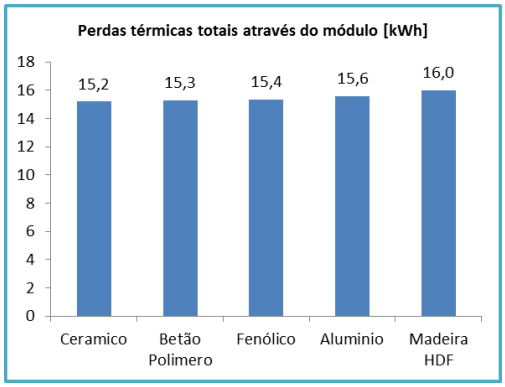


Fig. 5.10 - Perdas térmicas totais através do módulo durante o período de aquecimento

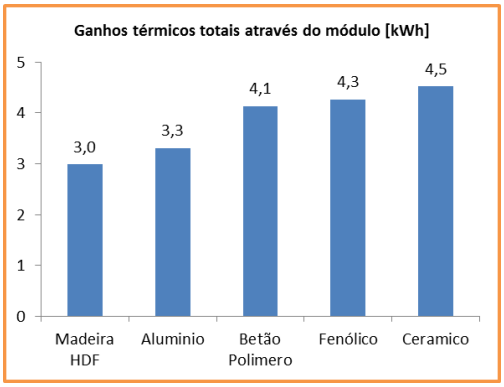


Fig. 5.12 - Ganhos térmicos totais pela envolvente durante o período de arrefecimento, 9-18h

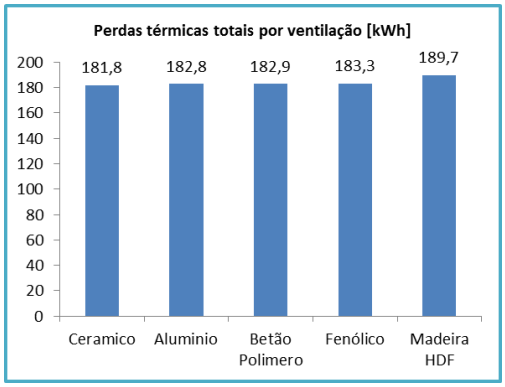


Fig. 5.11 - Perdas térmicas totais por ventilação durante o período de aquecimento ($Q=30m^3/h$)

Analisando a Fig. 5.10 e a Fig. 5.11 verifica-se que, tal como analisado anteriormente, é o módulo com placagem em cerâmico aquele que permite uma menor perda térmica tanto a nível das perdas pela envolvente bem como a nível de perdas por ventilação.

Durante o período de arrefecimento a placagem em cerâmica é aquela que permite maiores ganhos pela envolvente (mais 1,5kWh do que a placagem em madeira), no entanto esta diminuição de desempenho durante a estação de arrefecimento é compensada pelo melhor desempenho durante o clima mais frio pelo que o material cerâmico será a escolha mais acertada do ponto de vista do balanço térmico para a placagem do módulo.

5.3. COR DA PLACAGEM

5.3.1. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

Tabela 5.2 - Condições de simulação para cor da placagem

Condições de simulação	
Parâmetro	**Valor**
Modelo do módulo	3
Espessura da caixa de ar	0,08 m
Material de Revestimento	Cerâmico
Cor do revestimento	Cerâmico
Isolamento	XPS 8cm
Parede de Suporte	Dupla 15+11 s/iso
Orientação	Sul
Zona Climática	Porto
Graus-Dias Base	1753

A cor da placagem é uma característica essencial e com grande importância no sistema em análise.

Foram simulados módulos com três cores distintas: clara, média e escura.

A cada uma das cores corresponde um coeficiente de absorção diferente. Este coeficiente irá influenciar a quantidade de energia térmica proveniente da radiação solar que será absorvida pela placagem e consequentemente a porção de energia que será refletida.

Os coeficientes de absorção considerados são aqueles presentes no Quadro V.5 do RCCTE(DIÁRIO DA REPÚBLICA, 2006).

Cor da superfície exterior da protecção solar

Cor da protecção	Clara	Média	Escura
Coeficiente de absorção solar da superfície exterior da protecção	0,4	0,5	0,8
Cor	Branco. Creme. Amarelo. Laranja. Vermelho-claro.	Vermelho-escuro. Verde-claro. Azul-claro.	Castanho. Verde-escuro. Azul-vivo. Azul-escuro. Preto.

Fig. 5.13 - Coeficiente de absorção da radiação solar da superfície exterior da placagem

A cor da placagem tem grande influência na quantidade de energia absorvida e transmitida pela placagem do módulo para o interior da caixa de ar.

5.3.2. ANÁLISE

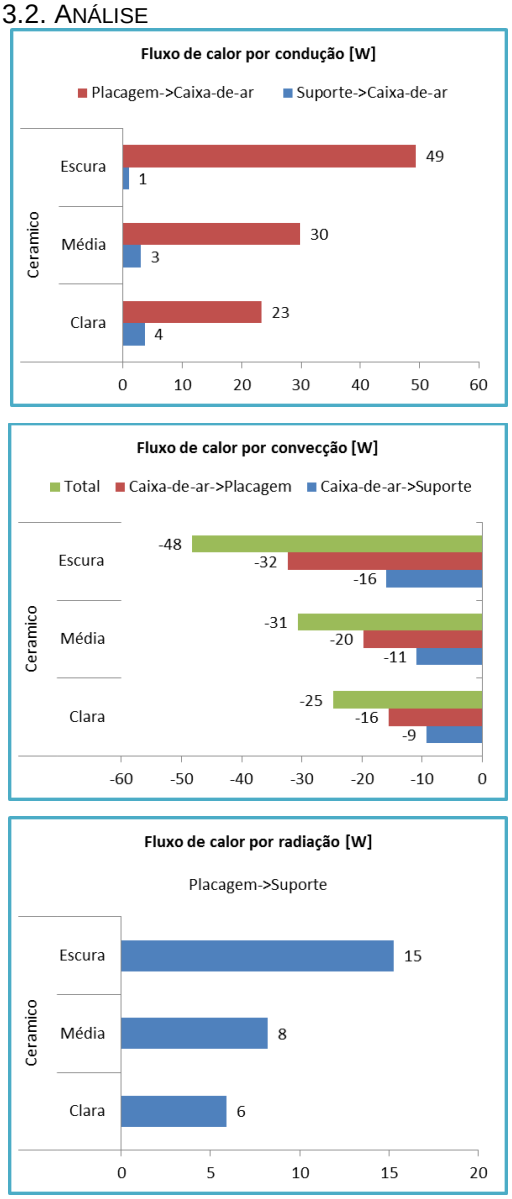


Fig. 5.14 - Fluxo de calor por condução, convecção e radiação durante o período aquecimento, 9-18h

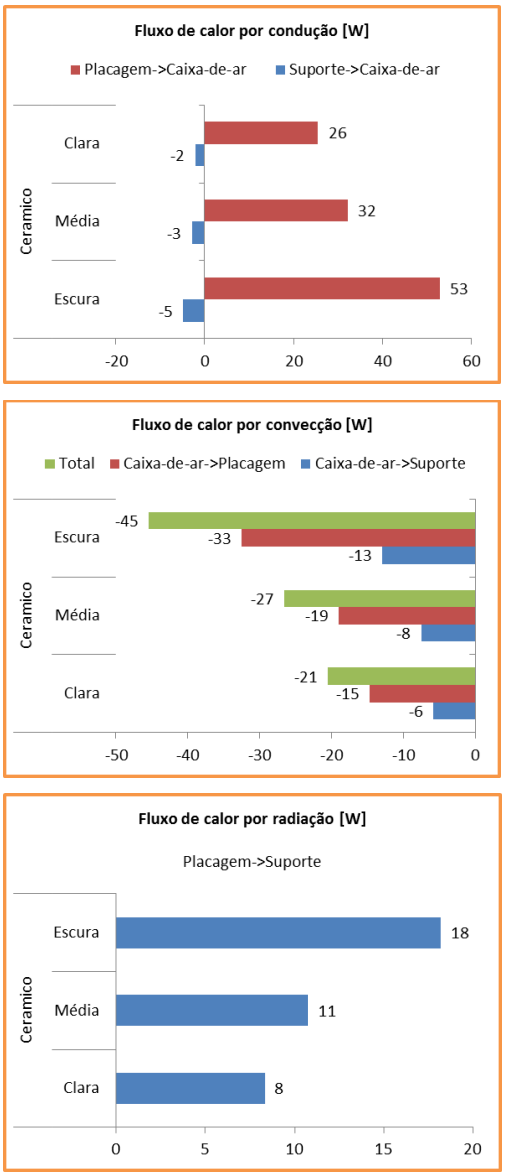


Fig. 5.15 Fluxo de calor por condução, convecção e radiação durante o período de arrefecimento, 9-18h

Analisando as figuras acima verifica-se que uma placagem de cor escura apresenta uma grande vantagem durante o período de aquecimento visto permitir um aumento de transmissão de energia térmica por condução através do módulo (49W) e um consequente aumento de temperatura na caixa de ar devido ao maior fluxo de calor por convecção calculado (48 W). A cor escura é também aquela que permite maiores trocas radiativas entre a placagem e o isolamento promovendo o aquecimento deste último.

Todos estes fatores fazem com que a nível de diminuição de perdas térmicas a cor de placagem escura seja a mais indicada reduzindo as perdas pela envolvente para 1W.

Sendo a cor escura a que possibilita maiores trocas por convecção é também a ela que se encontra associado o maior efeito de pré-aquecimento do ar de ventilação permitindo um aumento, em média, de 4,8ºC da temperatura do ar admitido para a habitação como é possível verificar na figura seguinte.

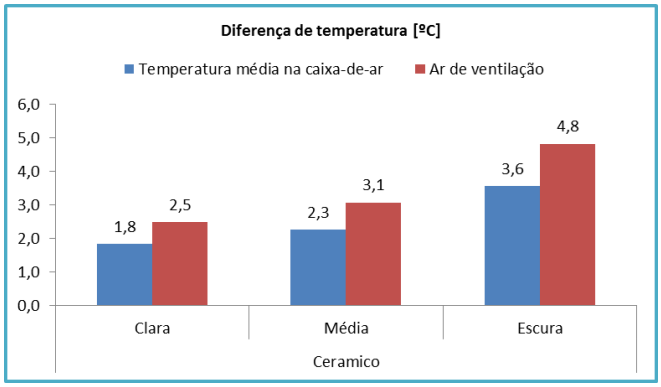


Fig. 5.16 - Diferença de temperatura em relação ao clima exterior durante o período de aquecimento 9-18h

As placagens de cor clara e média permitem aumentos de temperatura menores, no entanto ainda apreciáveis, 2,5ºC e 3,1ºC respetivamente.

É preciso no entanto verificar o comportamento do módulo durante o período de arrefecimento.

Analisando os gráficos da Fig. 5.15 verifica-se que é mais uma vez a placagem de cor escura que potência o aquecimento do ar na caixa de ar do módulo bem como da própria placagem e camada isolante. No entanto, este comportamento não é benéfico durante o período de arrefecimento.

Neste caso é a placagem de cor clara que apresenta benefícios visto apresentar o menor fluxo de calor através da placagem (26W) bem como o menor fluxo de calor por convecção (21W) e radiação (8W).

Estes fatores conjugados permitem que o aumento da temperatura na caixa de ar seja, em média, só de 3,1ºC face aos 5,4ºC verificados pela placagem de cor escura como é possível verificar na figura seguinte.

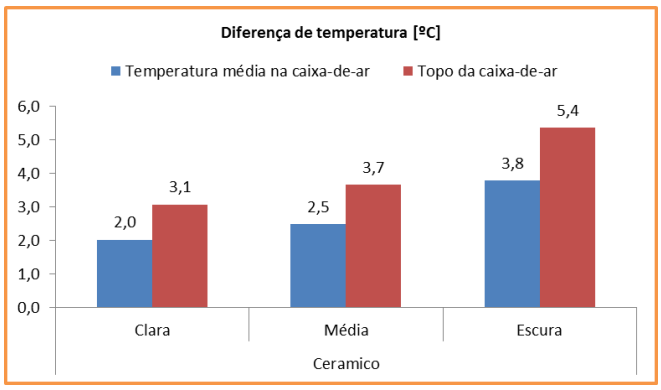


Fig. 5.17 - Diferença de temperatura em relação ao clima exterior durante o período de arrefecimento, 9-18h

5.3.3. CONCLUSÃO

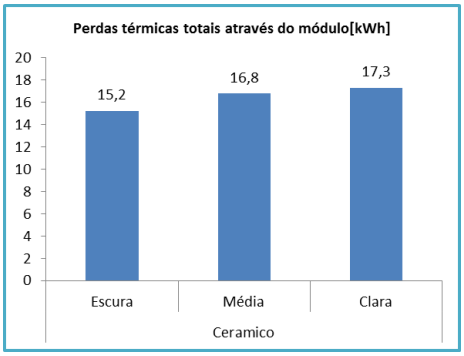


Fig. 5.18 - Perdas térmicas totais através do módulo durante o período de aquecimento

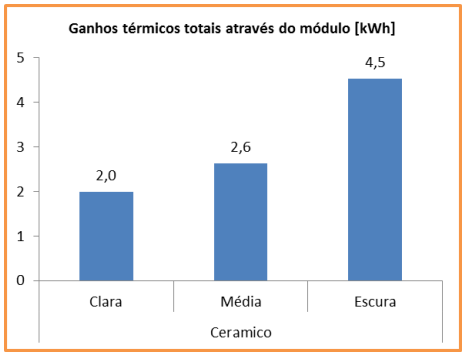


Fig. 5.20 - Ganhos térmicos totais através do módulo durante o período de arrefecimento, 9-18h

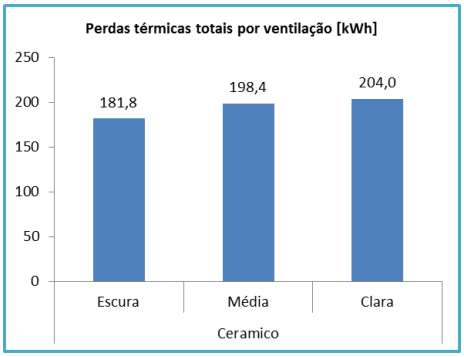


Fig. 5.19 - Perdas térmicas totais por ventilação durante o período de aquecimento (Q=30m^3/h)

Pela análise das figuras acima é possível verificar que a placagem de cor clara e média apresentam um comportamento similar tanto a nível de perdas pela envolvente e ventilação durante o período de aquecimento bem como a nível de ganhos pela envolvente durante o período de arrefecimento.

Sendo que a placagem de cor média apresenta um desempenho ligeiramente superior entre as duas, especialmente a nível da diminuição das perdas por ventilação.

Já para a placagem de cor escura foram registadas diferenças mais apreciáveis permitindo uma diminuição de perdas pela envolvente e de perdas por ventilação, 2,1kWh e 22,2kWh respetivamente, em comparação com a placagem de cor clara.

Já durante o período de arrefecimento a placagem de cor escura aumenta os ganhos térmicos pela envolvente em 2,5kWh comparativamente à placagem de cor clara.

Do ponto de vista térmico, tendo em conta os valores registados bem como o já descrito no ponto 5.3.2 a cor de placagem escura é aquela que permite um melhor desempenho global do módulo, especialmente a nível do pré-aquecimento do ar.

No entanto é preciso salvaguardar o comportamento do módulo durante o verão garantindo que não irá ocorrer sobreaquecimento do espaço interior sendo necessário garantir as condições de ventilação entre outras.

Para além disso, é preciso ter em conta que materiais de construção de cor escura encontram-se mais sujeitos a choques térmicos sendo esta uma característica indesejável a nível da placagem do módulo.

Está é no entanto uma característica do módulo em que critérios estéticos irão também ter um grande peso no tipo de cor a adotar.

5.4. ESPESSURA DO ISOLAMENTO

5.4.1. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

Tabela 5.3 - Condições de simulação, espessura do isolamento

Condições de simulação	
Parâmetro	**Valor**
Modelo do módulo	3
Espessura da caixa de ar	0,08 m
Material de Revestimento	Cerâmico
Cor do revestimento	Média
Isolamento	XPS 3,6 e 8cm
Parede de Suporte	Dupla 15+11 s/iso
Orientação	Sul
Zona Climática	Porto
Graus-Dias Base	1753

A espessura da camada de isolamento do módulo é uma variável com um comportamento interessante e que será analisada de forma diferente às anteriores.

A espessura da camada de isolamento irá influenciar o U do sistema parede+módulo determinando assim, entre outras coisas, a transmissão de calor por condução através da parede.

Tal como já foi referido, a caixa de ar do módulo tem duas funções, criar um micro-clima no seu interior geralmente mais favorável do que o exterior e servir também como recuperador de calor tanto daquele vindo do clima exterior como de dentro da habitação.

5.4.2. ANÁLISE

No gráfico seguinte encontram-se representadas os resultados dos cálculos do fluxo de calor por condução médio às 9:00 horas durante o período de aquecimento.

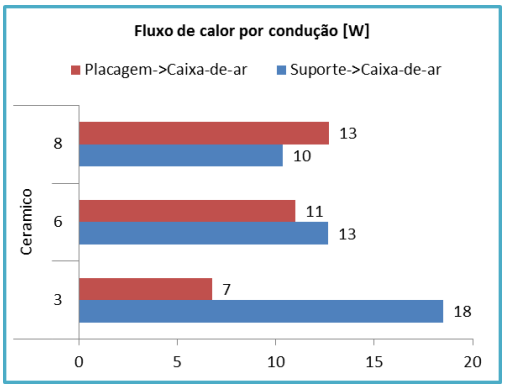


Fig. 5.21 - Fluxo de calor por condução, período de aquecimento 9:00h.

Pela análise do gráfico é claramente visível que a espessura de isolamento de 3cm é aquela em que se verifica uma maior perda térmica pela envolvente (18W), como seria de esperar.

De seguida apresenta-se os mesmos cálculos mas neste caso efetuados para as 13:00 horas.

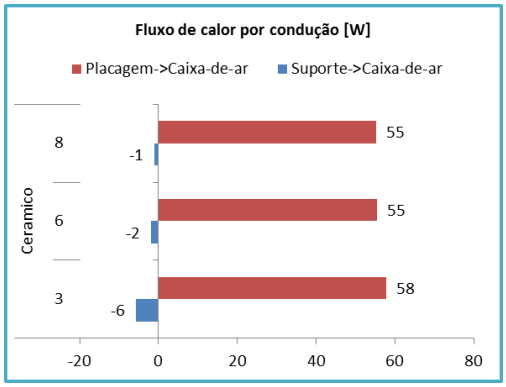


Fig. 5.22 - Fluxo de calor por condução, período de aquecimento 13:00h.

Pela análise do gráfico verifica-se que o isolamento de menor espessura, 3 cm, é aquele onde se verifica um maior fluxo de calor por condução em direção ao interior.

Durante o período de aquecimento realmente pretende-se aumentar, se possível, os ganhos térmicos pela envolvente de forma a diminuir a necessidade de aquecimento, o que parece verificar-se durante o dia usando uma espessura de isolamento menor.

No entanto, analisemos as temperaturas calculadas em diversos pontos do sistema, representadas na figura seguinte;

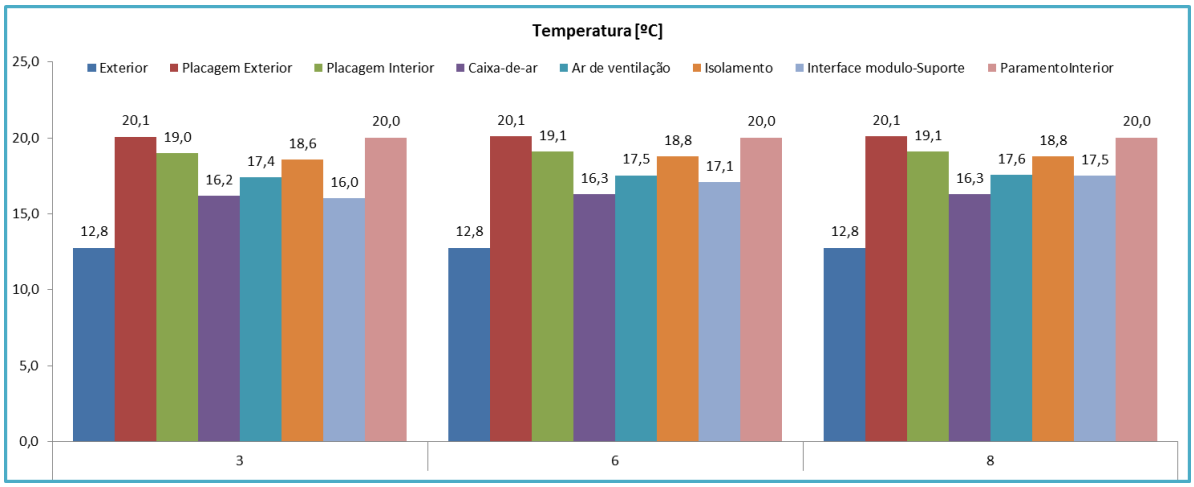


Fig. 5.23 - Temperaturas em vários pontos dos módulos, módulos apresentados por decrescente temperatura média na caixa de ar, período de arrefecimento 13h

Verifica-se que o maior fluxo de calor em direção ao interior obtido pelo uso do isolamento de menor espessura se deve ao facto de a temperatura calculada no interface modulo-suporte ser menor (16,0ºC) do que aquela verificada nas restantes opções (17,1ºC e 17,5ºC para os isolamentos de 6 e 8 cm respetivamente).

Assim sendo, apesar do fluxo de calor em direção ao interior da habitação ser superior no caso de isolamento de 3cm, este apresenta uma performance inferior visto permitir uma maior diminuição da temperatura da parede de suporte, e consequentemente do desempenho térmico do sistema.

Este facto é claramente visível quando se compara o fluxo de calor por condução médio diário durante o período de aquecimento, representado na figura seguinte.

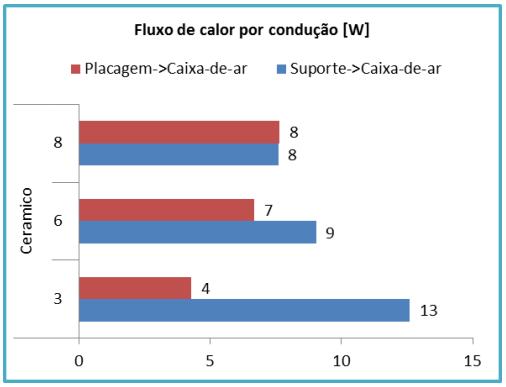


Fig. 5.24 - Fluxo de calor por condução, período de aquecimento 0-24 horas

O isolamento de 3cm é aquele que apresenta o menor desempenho verificando-se perdas médias de 13W por dia pela envolvente.

Já os isolamentos de 8 e 6 cm apresentam performances semelhantes, 8W e 9W respetivamente.

A figura seguinte representa o ganho de temperatura médio diário em relação ao exterior.

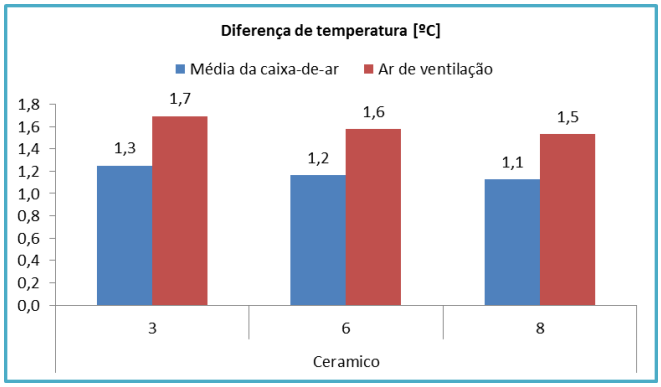


Fig. 5.25 - Diferença de temperatura em relação ao clima exterior ,período de aquecimento 0-24h

Verifica-se que os valores calculados são extremamente semelhantes podendo assim afirmar-se que o comportamento do módulo como recuperador de calor proveniente do espaço interior é muito modesto.

Assim sendo, a espessura da camada de isolamento do módulo não parece ter influência na temperatura média da caixa de ar nem no pré-aquecimento do ar de ventilação.

Durante a estação de arrefecimento interessa também isolar a envolvente de forma a diminuir os ganhos térmicos. É preciso no entanto garantir que não haja risco de sobreaquecimento e que o interior da habitação se mantenha a uma temperatura adequada.

Na figura seguinte encontra-se representado o fluxo de calor por condução médio entre as 9:00 e 18:00 horas durante o período de arrefecimento.

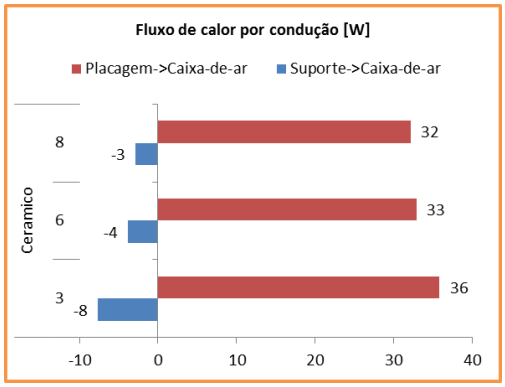


Fig. 5.26 - Fluxo de calor por condução médio, periodo de arrefecimento 9-18h

Verifica-se que é mais uma vez o isolamento térmico de maior espessura que apresenta o melhor desempenho diminuindo os ganhos térmicos pela envolvente para 3W.

O isolamento de 6cm apresenta um desempenho semelhante (46W) sendo que o isolamento de menor espessura é aquele que apresenta menor desempenho permitindo ganhos térmicos pela envolvente do valor de 8W.

5.4.3. Conclusão

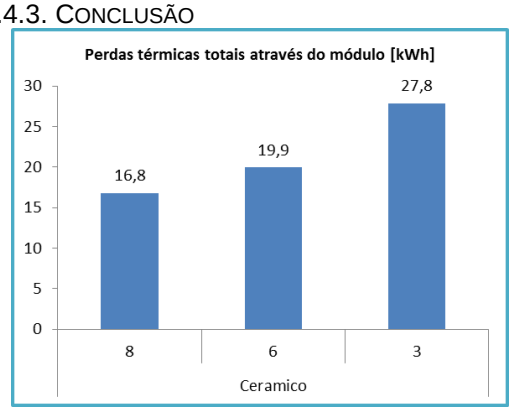


Fig. 5.27 - Perdas térmicas totais através do módulo durante o período de aquecimento

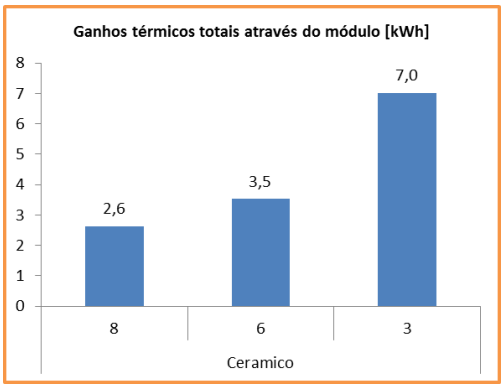


Fig. 5.29 - Ganhos térmicos totais através do módulo durante o período de arrefecimento, 9-18h

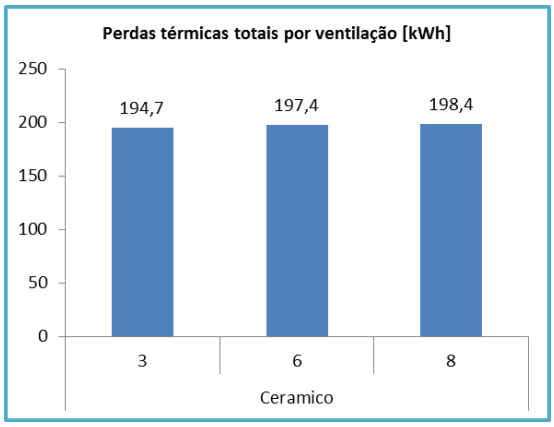


Fig. 5.28 - Perdas térmicas totais por ventilação durante o período de aquecimento (Q=30m^3/h)

Como é possível verificar na Fig. 5.28 a espessura da camada de isolamento do módulo não altera significativamente a sua capacidade de pré-aquecimento do ar, pelo que como já foi concluído em

cima, a capacidade do módulo como recuperador de calor proveniente do interior da habitação é muito modesta.

De facto, entre a camada de isolamento de 3cm e de 8cm existe apenas uma diferença de 3,7kWh nas perdas térmicas por ventilação.

Já a nível do fluxo de calor por condução a espessura da camada de isolamento apresenta um papel importante, como seria de esperar.

O uso de uma camada isolante de 8cm permite uma redução das perdas térmicas pela envolvente na estação de aquecimento de 11kWh relativamente à camada de 3cm como é visível na Fig. 5.27.

Também durante a estação de arrefecimento a camada isolante de maior espessura é aquela que apresenta um melhor desempenho tendo sido registados 2,6 kWh de ganhos térmicos pela envolvente face aos 7,0kWh registados para a camada de isolamento de 3cm.

No entanto, o desempenho das camadas de isolamento de 8cm e 6cm de espessura é semelhante pelo que se a diferença de custo entre as duas for apreciável é possível que a solução de 6cm de espessura seja a solução mais adequada para o sistema.

5.5. ESPESSURA DA CAIXA DE AR

5.5.1. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

Tabela 5.4 - Condições de simulação, espessura da caixa de ar

Condições de simulação	
Parâmetro	**Valor**
Modelo do módulo	2
Espessura da caixa de ar	0,01 ; 0,02 ; 0,03 ; 0,05 ; 0,08m
Material de Revestimento	Cerâmico
Cor do revestimento	Média
Isolamento	XPS 8cm
Parede de Suporte	Dupla 15+11 s/iso
Orientação	Sul
Zona Climática	Porto
Graus-Dias Base	1753

A espessura da caixa de ar afeta o fluxo de ar que percorre o módulo tanto a nível de velocidade bem como de quantidade de calor transmitida entre as superfícies da caixa de ar e o ar que a percorre.

Estas trocas de calor são complexas e de difícil simulação.

Relembre-se que o CAPSOL é um programa de simulação térmica, ou seja, o programa pode calcular temperaturas de superfícies e zonas mas não foi desenhado para calcular fluxos de ar entre zonas dependendo da sua temperatura.

Para colmatar esta limitação os criadores do CAPSOL construíram um modelo de ventilação independente do programa usando uma folha de cálculo Excel.

Este é um modelo simplificado que permite calcular taxas de ventilação entre zonas em função da sua temperatura.

Durante o período de aquecimento o caudal que percorre a caixa de ar é constante e pré-determinado pelo que o modelo de ventilação apenas é usado durante o período de arrefecimento como descrito anteriormente.

Sendo assim, durante a estação de aquecimento assume-se um caudal constante que não depende da espessura da caixa de ar não tendo este parâmetro qualquer influência no comportamento térmico do módulo.

Realizando simulações analisando módulos com diferentes espessuras de caixa de ar registaram-se os seguintes valores para o fluxo de calor por condução e convecção.

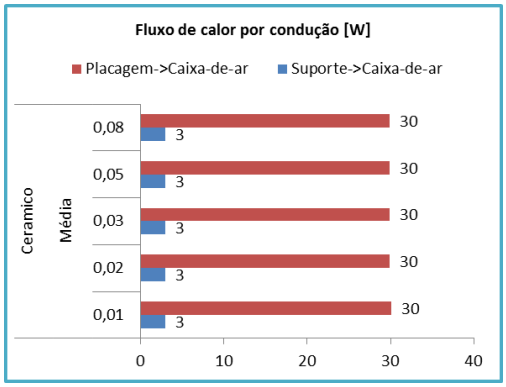


Fig. 5.30 - Fluxo de calor por condução, período de aquecimento 9-18h

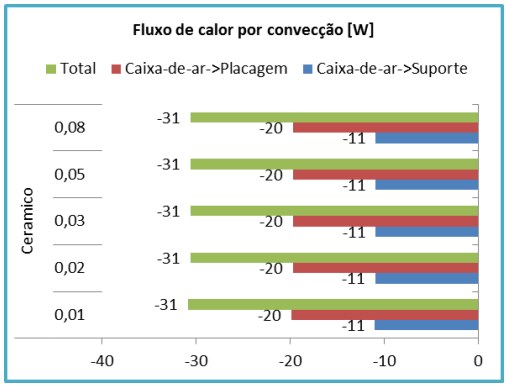


Fig. 5.31 - Fluxo de calor por convecção, período de aquecimento 9-18h

Como se pode verificar pelas figuras acima a espessura da caixa de ar não tem influência no comportamento do painel durante o período de aquecimento.

De facto, o ganho de temperatura verificado nas diferentes simulações é igual para todas as espessuras consideradas como é visível no gráfico seguinte.

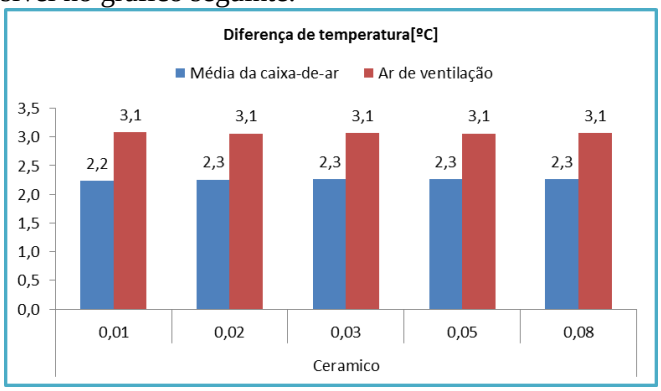


Fig. 5.32 - Diferença de temperatura em relação ao exterior, período de aquecimento 9-18h

Já durante a estação de arrefecimento é utilizado o modelo de ventilação em Excel para simular o efeito chaminé na cavidade.

Os cálculos efetuados encontram-se representados nas figuras seguintes.

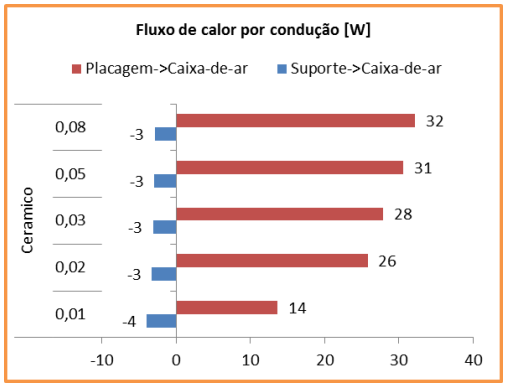


Fig. 5.33 - Fluxo de calor por condução, período de arrefecimento 9-18h

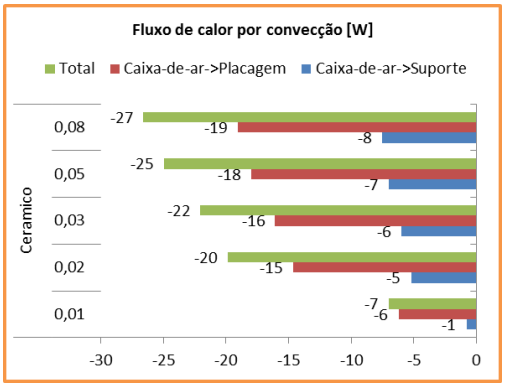


Fig. 5.34 - Fluxo de calor por convecção, período de arrefecimento 9-18h

Como é possível constatar, a espessura da cavidade já influencia os resultados obtidos quando a ventilação é calculada através do modelo de ventilação em Excel.

Uma vez que o caudal é determinado apenas pelo efeito chaminé, não se tendo em conta a ação do vento, o caudal é dependente da espessura da cavidade bem como da diferença de temperatura entre esta e o clima exterior.

Os caudais médios calculados para cada simulação encontram-se representados na figura seguinte.

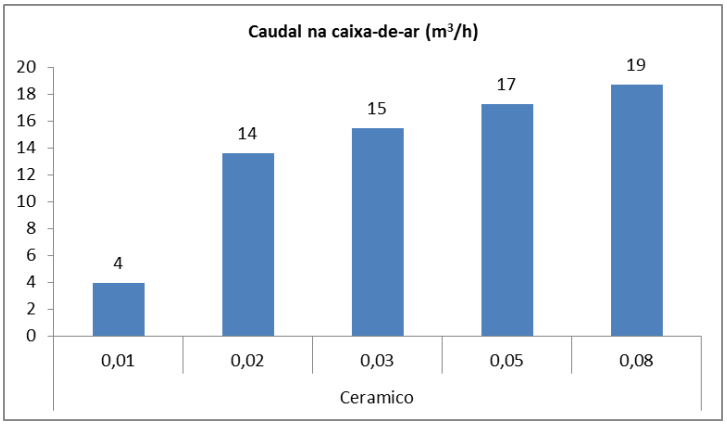


Fig. 5.35 - Caudal médio na caixa de ar, período de arrefecimento 9-18h

Verifica-se que o módulo com cavidade de espessura de 1cm apresenta um caudal de ventilação muito reduzido ($4m^3/h$) o que leva a que a taxa de ventilação da cavidade seja reduzida e consequentemente a temperatura do ar da caixa de ar seja superior aos restantes módulos como é visível na figura seguinte.

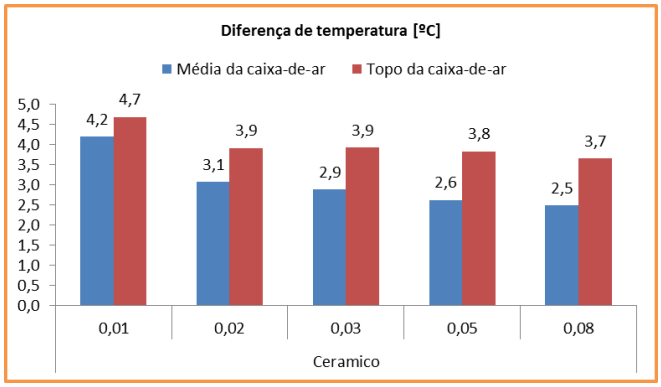


Fig. 5.36 - Ganhos de temperatura em relação ao exterior, período de arrefecimento 9-18h

No módulo com cavidade de 8cm de espessura a o ganho de temperatura médio calculado na caixa de ar é de 2,5ºC face ao clima exterior (Fig. 5.36), sendo assim este o módulo que apresenta melhor desempenho na diminuição dos ganhos térmicos pela envolvente durante o período de arrefecimento.

No entanto, devido à presença da camada de isolamento do módulo as diferenças de temperatura verificadas na caixa de ar dos diferentes módulos acabam por ter pouco significado visto terem um impacto limitado na quantidade de calor transmitido para o interior por condução através da parede.

Uma análise das temperaturas ao longo de diferentes pontos do módulo permite observar este facto em maior pormenor.

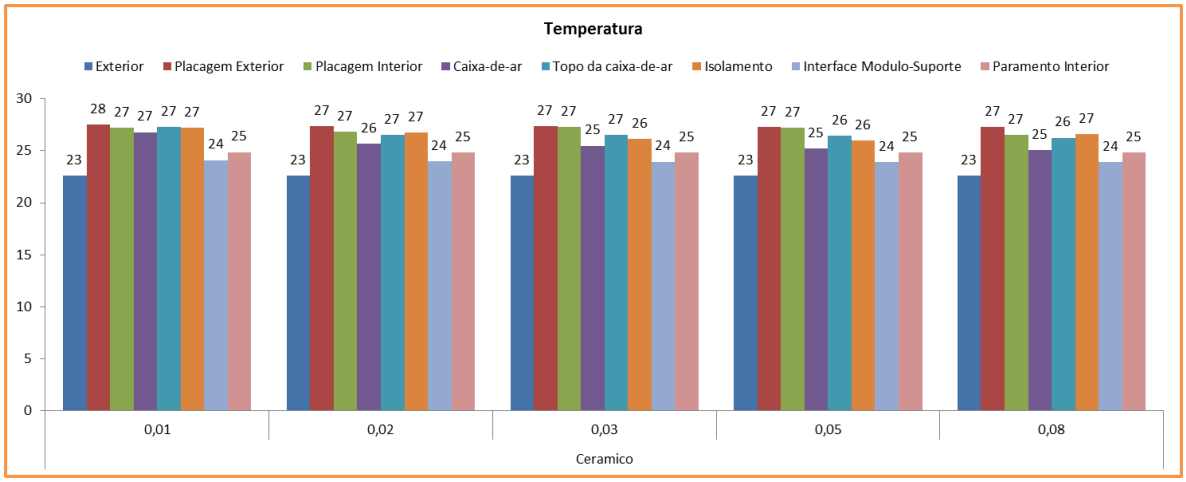


Fig. 5.37 - Temperaturas em vários pontos dos módulos, módulos apresentados por decrescente temperatura média na caixa de ar , período de arrefecimento 9-18h

Como é possível verificar na Fig. 5.37 a temperatura no interface modulo-parede de suporte é igual em todas as simulações realizadas pelo que a quantidade de ganhos térmicos pela envolvente é similar em todos os casos.

5.5.2. Conclusão

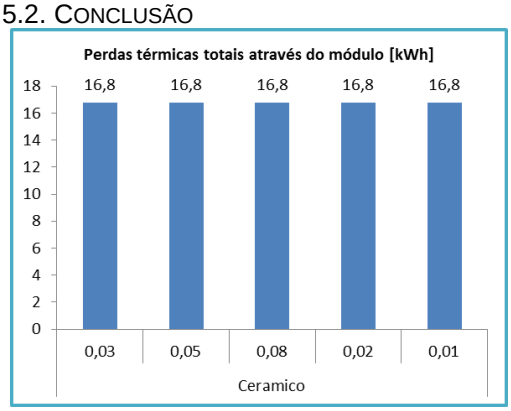


Fig. 5.38 - Perdas térmicas totais através do módulo durante o período de aquecimento

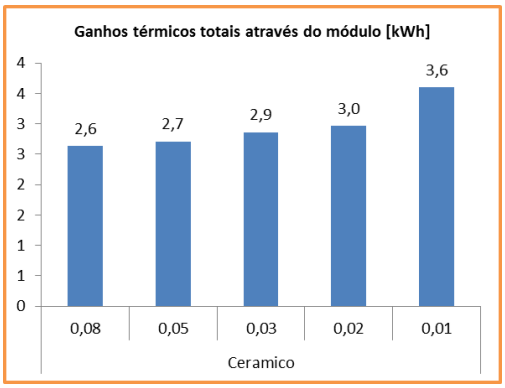


Fig. 5.40 - Ganhos térmicos totais através do módulo durante o período de arrefecimento, 9-18h

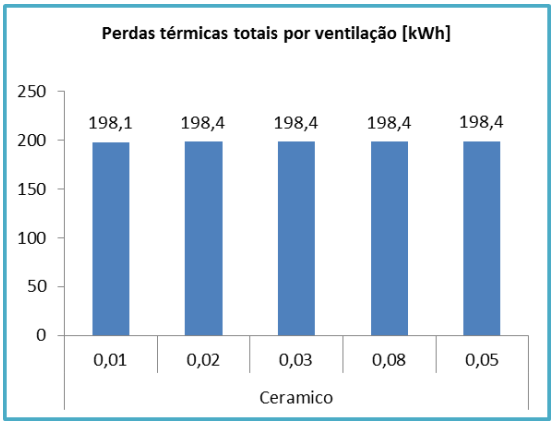


Fig. 5.39 - Perdas térmicas totais por ventilação durante o período de aquecimento ($Q=30m^3/h$)

Como já foi referido anteriormente durante o período de aquecimento é fixo um caudal constante de ventilação pelo que o programa não é sensível à variação da espessura da caixa de ar pelo que os valores registados na Fig. 5.38e na Fig. 5.39 relativas às perdas térmicas pela envolvente e as perdas térmicas devido à ventilação respetivamente apresentam valores iguais para todos os módulos simulados.

Durante o período de arrefecimento os módulos apresentam desempenhos muito similares sendo que o módulo com 8cm de espessura da caixa de ar é aquele que apresenta ligeiramente melhor desempenho.

No entanto, como já referido anteriormente, o CAPSOL não permite a simulação precisa dos fenómenos de deslocação de ar na caixa de ar. Assim sendo, para melhor análise deste parâmetro será necessário recorrer a um programa com maiores capacidades a nível da simulação de deslocamento de massas de ar devido a um gradiente de temperaturas bem como tendo em conta o efeito do vento, um parâmetro importante quando se analisa comportamentos deste tipo.

5.6. EMISSIVIDADE DOS MATERIAIS DA CAIXA DE AR

5.6.1. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

Tabela 5.5 - Condições de simulação, emissividade dos materiais da caixa de ar

Condições de simulação	
Parâmetro	**Valor**
Modelo do módulo	2
Espessura da caixa de ar	0,08 m
Material de Revestimento	Cerâmico, Cerâmico low e
Cor do revestimento	Média
Isolamento	XPS, XPS low e 8cm
Parede de Suporte	Dupla 15+11 s/iso
Orientação	Sul
Zona Climática	Porto
Graus-Dias Base	1753

Com vista a melhorar o comportamento do módulo durante a estação de aquecimento bem como de arrefecimento e estudar a influência deste fator no pré-aquecimento do ar de ventilação estudou-se a possibilidade de aplicação de uma película de baixa emissividade na face interior da placagem, na camada de isolamento ou em ambas.

5.6.2. ANÁLISE

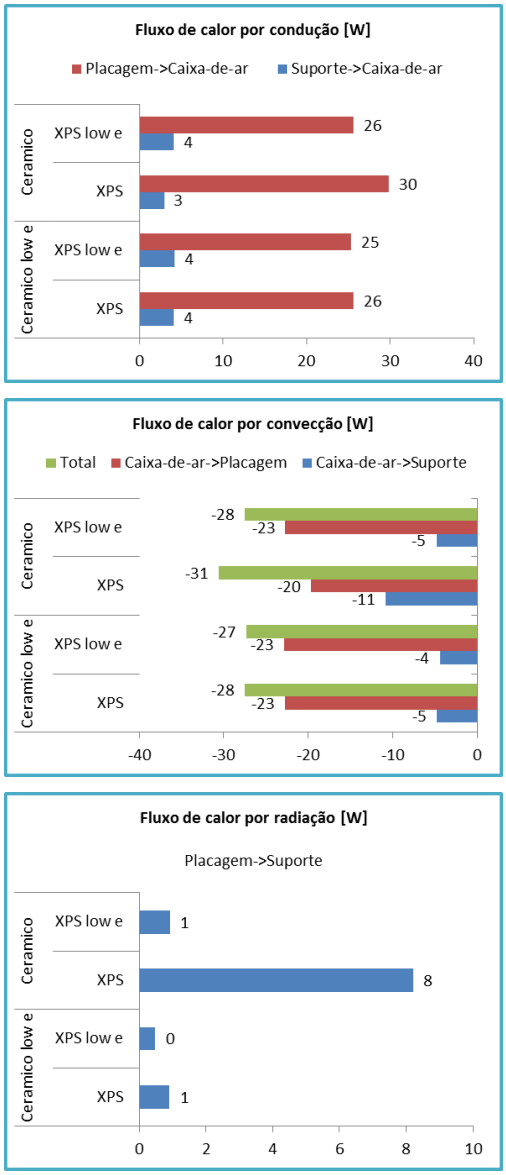


Fig. 5.41 - Fluxo de calor por condução, convecção e radiação, período de aquecimento 9-18h

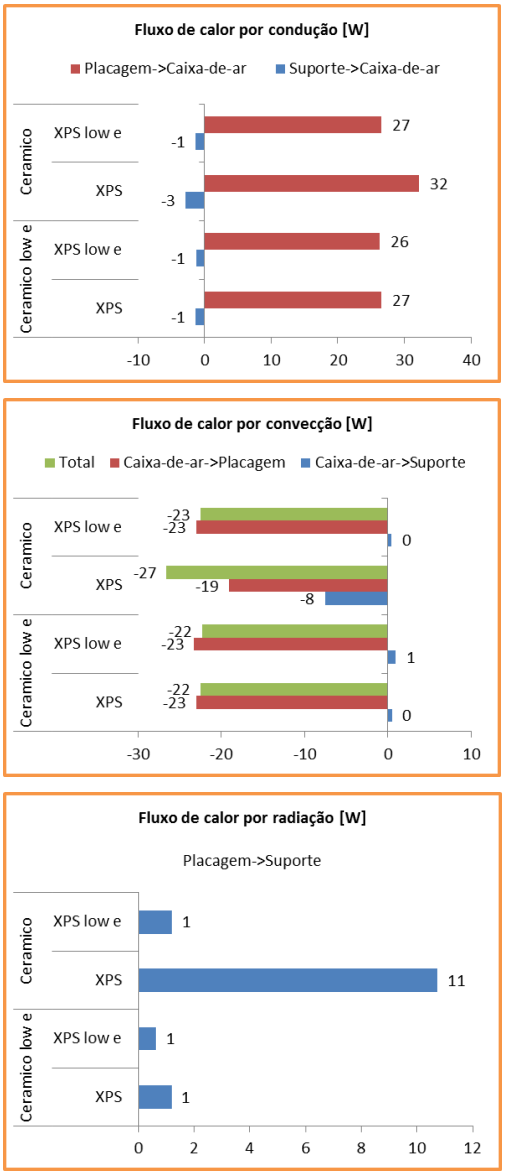


Fig. 5.42 - Fluxo de calor por condução, convecção e radiação, período de arrefecimento 9-18h

Como se pode observar nas figuras acima a presença de uma película de baixa emissividade diminui consideravelmente o fluxo de calor por radiação entre a placagem e a camada de isolamento do módulo.

Este facto faz com que a camada de isolamento do módulo apresente uma temperatura inferior visto não estar a ser aquecida devido a trocas radiativas.

Como a camada de isolamento se encontra a uma menor temperatura irão existir menos trocas convectivas na caixa de ar fazendo com que o ar no interior da cavidade atinja temperaturas menos elevadas como pode ser observado nas figuras seguintes.

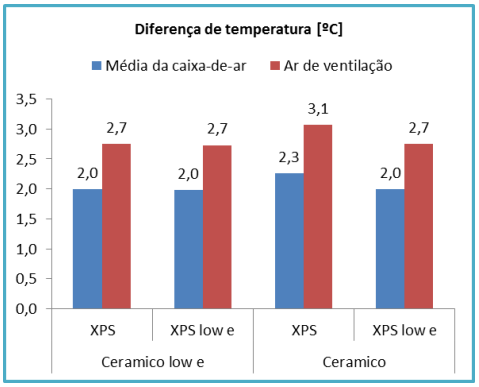


Fig. 5.43 - diferença de temperatura em relação ao exterior, período de aquecimento 9-18h

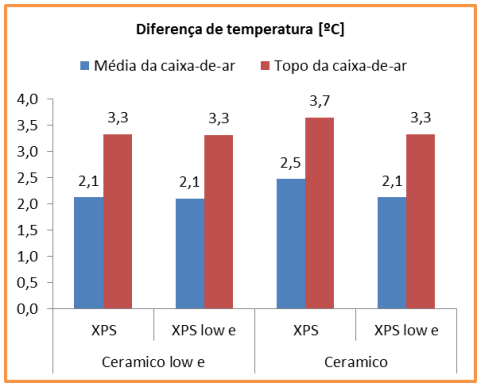


Fig. 5.44 - diferença de temperatura em relação ao exterior, período de arrefecimento 9-18h

Verifica-se que o local de aplicação da película de baixa emissividade não influencia o comportamento do módulo. A película pode ser aplicada tanto no interior da placagem como na camada isolante ou ambos apresentando o mesmo desempenho, assim sendo a colocação da película deverá ser realizada na superfície que seja mais economicamente viável.

A presença da película de baixa emissividade permite a diminuição da temperatura do ar da caixa-de ar em 0,3ºC no período de aquecimento e 0,4ºC no período de arrefecimento.

Em termos de perdas pela envolvente a presença da película de baixa emissividade aumenta o fluxo de calor por condução em 1 (Fig. 5.41) em relação à situação sem presença de película o que aumenta assim o valor das perdas térmicas.

Já durante o período de arrefecimento a presença da película de baixa emissividade permite diminuir os ganhos térmicos pela envolvente em 2W (Fig. 5.42).

Assim sendo a presença de uma película de baixa emissividade nas faces voltadas para o interior da caixa de ar do módulo diminuem a sua capacidade de isolamento de pré-aquecimento do ar durante a estação de aquecimento mas aumentam a sua capacidade de isolamento durante a estação de arrefecimento visto diminuir o valor dos ganhos térmicos pela envolvente.

5.6.3. CONCLUSÃO

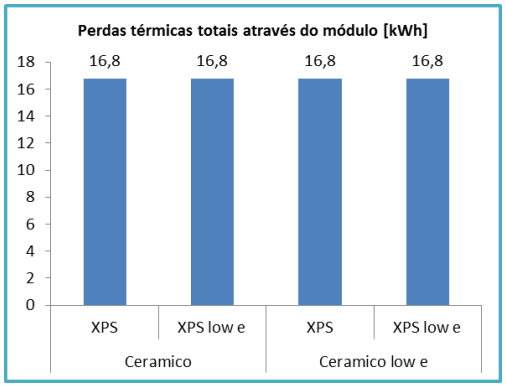


Fig. 5.45 - Perdas térmicas totais através do módulo durante o período de aquecimento

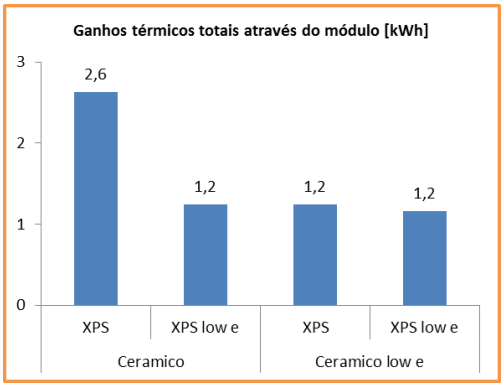


Fig. 5.47 - Ganhos térmicos totais através do módulo durante o período de arrefecimento, 9-18h

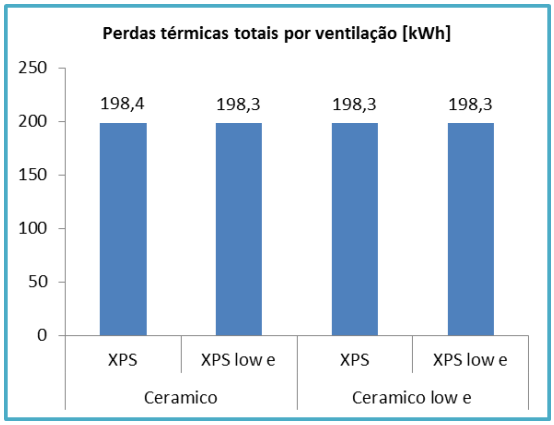


Fig. 5.46 - Perdas térmicas totais por ventilação durante o período de aquecimento (Q=30m^3/h)

A presença de uma película de baixa emissividade nas faces do módulo voltadas para a caixa-de-ar não aparenta nas simulações realizadas ter influência no comportamento térmico do módulo no período de aquecimento nas simulações realizadas.

Já no período de arrefecimento verifica-se uma ligeira diminuição dos ganhos térmicos pela envolvente (1,4kWh) como é visível na Fig. 5.47.

6 – Simulação de medidas de reabilitação numa habitação

6.1. INTRODUÇÃO

Depois de realizada a análise sobre as várias características que o módulo pode apresentar o passo seguinte será naturalmente simular qual a influência que a aplicação do módulo terá sobre uma habitação.

Para além disso será também interessante comparar o efeito que a aplicação do módulo terá na habitação com outras medidas de reabilitação como por exemplo a aplicação de um sistema ETICS.

Assim sendo, usando o programa CAPSOL, procedeu-se à simulação de uma divisão, com características simples, de uma habitação inserida num edifício.

Salienta-se que o principal objetivo das simulações não será o estudo do conforto térmico da habitação mas sim que efeitos terão as diferentes tipologias de fachadas consideradas sobre um espaço interior.

Mais pormenores sobre a simulação serão descritos de seguida.

6.2. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

6.2.1. DADOS CLIMÁTICOS

A divisão será simulada considerando a sua localização em três locais com climas distintos, um clima ameno (Porto), um clima frio (Bragança) e finalmente um clima quente (Évora).

Os dados climáticos destas três cidades foram obtidos, como já descrito anteriormente, através da base de dados presente no programa Solterm

6.2.2. Período de simulação

Considerou-se que seria útil realizar as simulações em dois períodos distintos, um durante o qual seria possível avaliar as necessidades de aquecimento e outro período em que poderia analisar o comportamento da divisão durante o verão.

Sendo assim foram realizadas simulações durante um período de aquecimento compreendendo os meses entre novembro e abril e durante um período de arrefecimento abrangendo os meses de junho, julho e agosto.

6.2.3. Descrição da divisão e componentes simulados

As dimensões internas da divisão em estudo são as seguintes: comprimento= 4m; profundidade=5m; altura=3m.

Será considerado que apenas uma das paredes da divisão é uma parede de fachada.

As restantes paredes interiores bem como o teto e o pavimento serão considerados como obedecendo a condições adiabáticas na fronteira entre a divisão e os espaços circundantes.

Serão realizadas simulações variando a orientação da parede de fachada da divisão incluindo a superfície de envidraçado entre quatro orientações: Norte, Este, Sul e Oeste.

Assim, será possível avaliar qual o comportamento do módulo consoante a orientação da parede onde será aplicado.

As áreas dos diferentes componentes da divisão são dadas na tabela seguinte.

Tabela 6.1 - Áreas de referência dos componentes da divisão

	Parede de fachada	**Envidraçado**	**Parede interna esquerda**	**Parede interna direita**	**Parede interna posterior**	**Pavimento**	**Teto**
Área (m^2)	9	3	15	15	12	20	20

Nas simulações foi considerada uma janela de vidro duplo com proteção solar e com as características descritas na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Características do envidraçado

Componente	**Transmissividade**	**Refletividade**	**Absortividade**
Proteção solar	0,4	0,5	0,3
Vidro	0,84	0,08	0,08

Considerou-se que durante o período de aquecimento a proteção solar é ativada se a temperatura no interior da divisão ultrapassar 25ºC.

Durante a estação de arrefecimento considera-se que a proteção solar se encontra sempre ativa.

As características térmicas dos componentes opacos da habitação são descritas na Tabela 6.3.

De salientar que apenas metade da espessura de cada componente foi considerada tendo em conta as condições adiabáticas de fronteira, a exceção será a parede de fachada que foi considerada na sua totalidade visto definir a fronteira entre o interior da divisão e o clima exterior.

Tabela 6.3 - Características térmicas dos componentes opacos da divisão

	d m	λ W/(m.K)	ρ Kg/m^3	c KJ/(Kg.K)
Parede de Fachada				
Reboco	0,012	1,2	900	0,85
Tijolo	0,15	0,400	1200	0,85
Cavidade	0,1	0,556	1,2	1
Tijolo	0,11	0,400	1200	0,85
Reboco	0,012	1,2	900	0,85
Parede Interior				
Reboco	0,01	1,2	900	0,80
Tijolo	0,035	0,40	1200	0,85
Teto				
Reboco	0,01	1,2	900	0,85
Betão	0,1	2,6	2300	0,93
Pavimento				
Madeira	0,01	0,170	700	2,07
Betão	0,1	2,6	2300	0,93

6.2.4. SISTEMAS DE CONTROLO DE TEMPERATURA E MEDIÇÃO DE ENERGIA NECESSÁRIA

Considerou-se que a temperatura do ar da divisão se deveria manter num intervalo de temperatura entre 20ºC e 25ºC.

Para isso três sistemas foram considerados, um sistema de arrefecimento, outro de aquecimento e por fim a ativação da proteção solar quando necessário.

Durante o período de aquecimento o sistema de aquecimento consiste na libertação de energia térmica diretamente no ar da habitação. Este sistema é ativado sempre que a temperatura interior for inferior a 20ºC.

Durante este período se a temperatura interior exceder os 25ºC é ativada a proteção solar do envidraçado.

Durante o período de arrefecimento considerou-se que a energia de arrefecimento é libertada por convecção por um pequeno cubo (lado 0,1m, emissividade 0). Esta consideração foi necessária de forma a haver uma separação entre a energia necessária para aquecimento e para arrefecimento da habitação no relatório do CAPSOL.

6.2.5. REGISTOS EFETUADOS

O relatório de cada simulação efetuada no CAPSOL apresenta os valores mensais da temperatura média diária na divisão bem como a temperatura média na divisão durante o dia (período das 9h as 18h).

Foram também registados as necessidades energéticas para o aquecimento e arrefecimento da habitação através do uso dos sistemas descritos em 6.2.4.

6.2.6. TIPOLOGIAS DE FACHADA SIMULADAS

Como já descrito anteriormente a parede de fachada da divisão simulada tem $12m^2$ sendo que destes $3m^2$ são de envidraçado sendo os restantes $9m^2$ envolvente opaca.

Assim sendo, a parede de fachada pode ser dividida em quatro parcelas verticais tendo cada uma 1m de lado e 3m de altura.

Uma das parcelas será ocupada pela fração envidraçada sendo consideradas para as restantes três as situações descritas de seguida.

Foram simuladas quatro tipos diferentes de fachadas.

Tipo 1 - Inicialmente foi simulada a fachada original da divisão consistindo numa parede dupla 15+11 sem isolamento da caixa de ar, o ar de ventilação é proveniente diretamente do ar exterior.

Tipo 2 - A segunda situação consiste na simulação da aplicação de um sistema ETICS na fachada com uma capacidade de isolamento similar ao proporcionado pelo módulo. A ventilação continua a ser realizada diretamente do ar exterior.

Tipo 3 - Na terceira situação foi simulado a aplicação dos módulos na parede de fachada. No entanto, os módulos apresentam um comportamento similar ao de uma fachada ventilada não sendo efetuado o pré-aquecimento do ar de ventilação.

Tipo 4 - A quarta situação apresenta características semelhantes à terceira, no entanto apenas dois dos módulos se comportam como uma fachada ventilada. O terceiro módulo é usado para o pré-aquecimento do ar de ventilação durante o período de aquecimento, durante o período de arrefecimento o comportamento do módulo altera-se passando também este a comportar-se como os restantes.

Os módulos usados apresentam as seguintes características:

Características dos módulos simulados	
Parâmetro	**Valor**
Modelo do módulo	3
Espessura da caixa de ar	0,05 m
Material de Revestimento	Cerâmico
Cor do revestimento	Média
Isolamento	XPS 6cm

A divisão tem $60m^3$ de volume tendo-se considerado que a ventilação garante uma renovação horária por hora do ar da divisão.

Sendo assim, o caudal de ventilação será de 60m^3/h independentemente de o ar ser admitido diretamente do clima exterior ou seja pré-aquecido através do módulo.

Optou-se por um caudal de 60m^3/h, correspondente ao volume total da divisão, de forma a ser mais percetível o impacto do pré-aquecimento do ar no comportamento térmico da divisão.

Teria sido possível considerar que a ventilação seria assegurada por dois módulos garantido cada um 30m^3/h, no entanto, decidiu-se considerar que o total caudal de ventilação seria assegurado por apenas um módulo. Esta escolha foi feita pois o autor considerou que na construção deste sistema um módulo para pré-ventilação do ar e outro sem esta capacidade teriam morfologias diferentes sendo que a nível de implementação no local cada divisão seria apenas servida por um módulo com objetivo de ventilação.

6.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

6.3.1. PERÍODO DE AQUECIMENTO

Durante o período de aquecimento, de novembro a abril, foram registadas as necessidades energéticas de aquecimento de forma a manter a temperatura da divisão no intervalo entre 20ºC e 25ºC.

As medições encontram-se representadas na tabela e gráficos seguintes.

Tabela 6.4 – Necessidades de aquecimento [kWh]

	Porto				Bragança				Évora			
Tipo de fachada	Norte	Este	Sul	Oeste	Norte	Este	Sul	Oeste	Norte	Este	Sul	Oeste
1	1285	1039	545	905	1704	1424	850	1284	1089	813	263	655
2	1098	862	398	739	1466	1198	657	1067	926	664	164	517
3	1099	860	400	742	1463	1195	659	1068	927	663	167	522
4	1066	816	348	700	1430	1147	599	1019	896	622	135	480

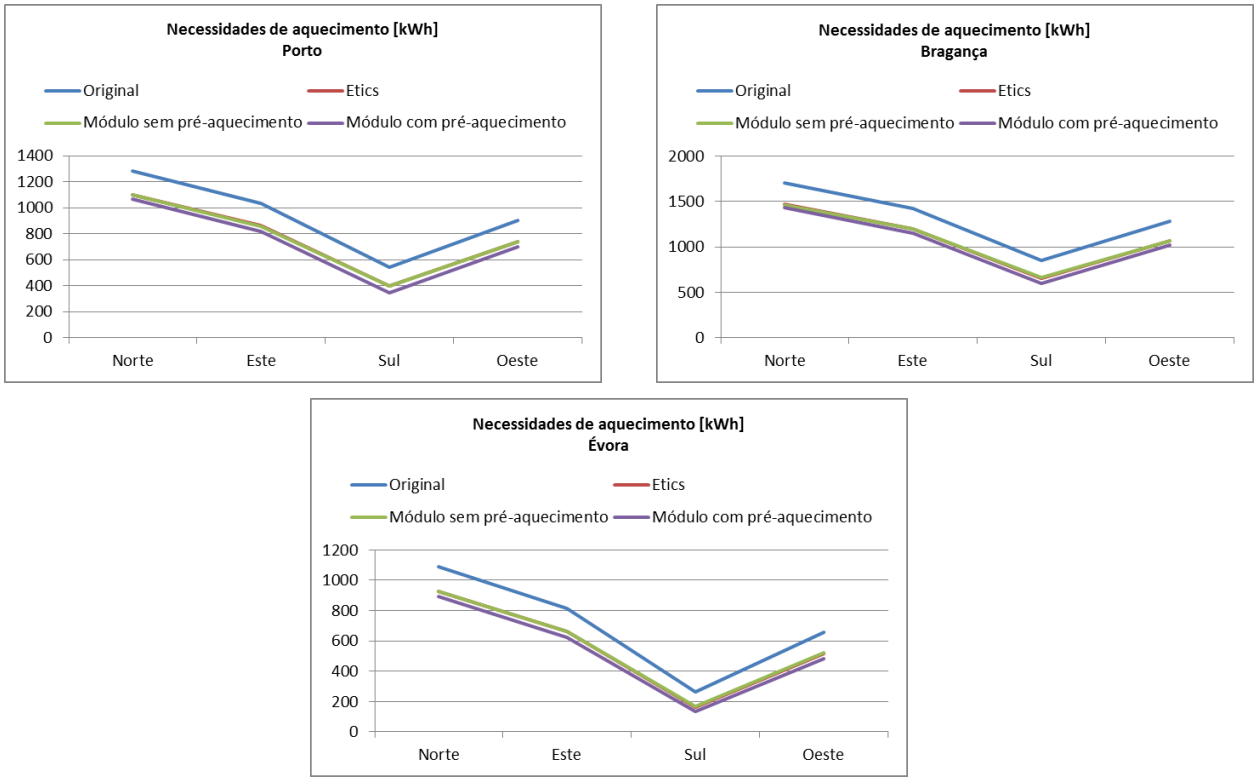


Fig. 6.1 – Necessidades de aquecimento

Como é possível verificar, todas as três soluções de reabilitação de fachada promovem um aumento da performance térmica do edifício e consequentemente uma diminuição da necessidade de energia necessária para o controlo do clima interior.

A curva referente ao ETICS e ao módulo sem pré-aquecimento apresentam valores muito próximos pelo que se encontram sobrepostas nos gráficos da Fig. 6.1.

As necessidades de aquecimento são menores na fachada orientada a Sul, este comportamento é esperado visto ser a fachada voltada a Sul a que apresenta maior incidência de radiação solar neste período do ano.

Já a fachada a Norte, que apresenta o menor valor de incidência de radiação solar é aquela onde se verifica a maior necessidade de aquecimento.

De forma a melhor compreender quais as vantagens, se existirem, da aplicação dos módulos com ou sem pré-aquecimento foi calculada a diferença entre as necessidades de aquecimento registadas com os módulos face ao sistema ETICS.

Os valores registados são apresentados de seguida.

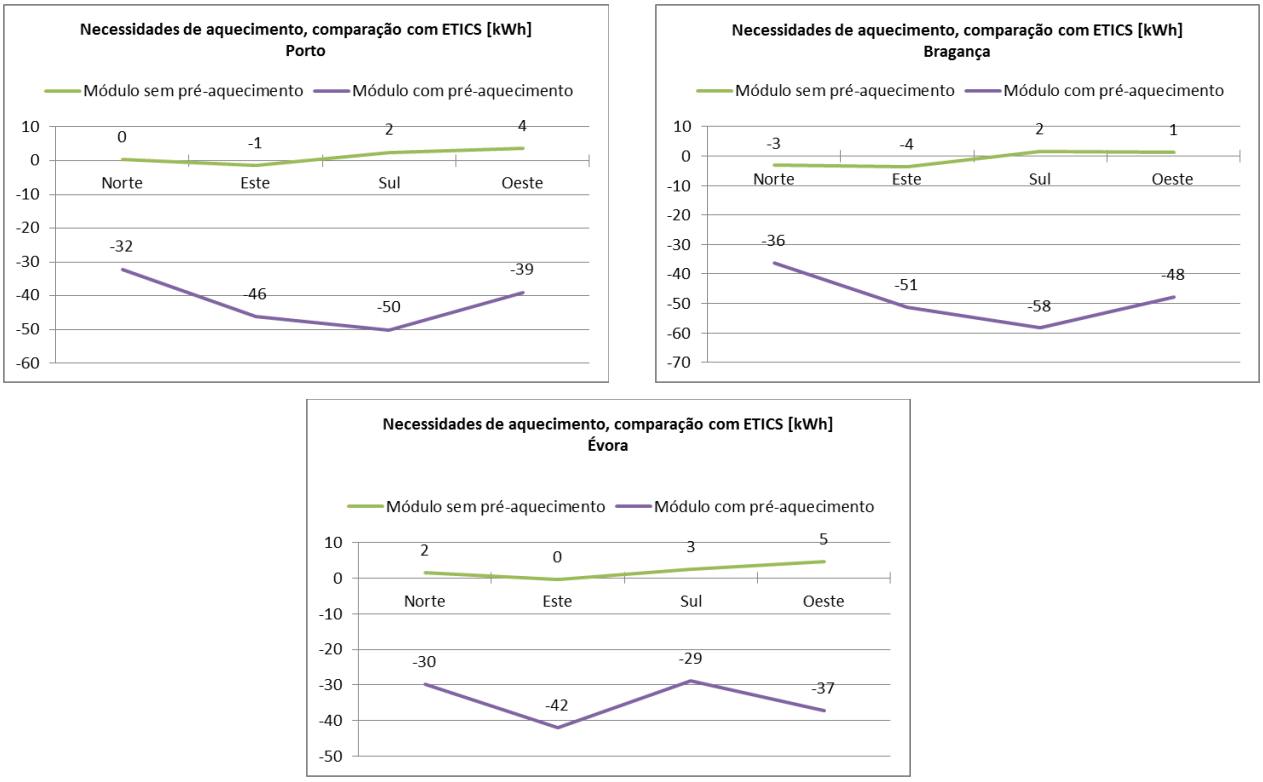


Fig. 6.2 - Necessidades de aquecimento, comparação com ETICS

Analisando os gráficos da Fig. 6.2 verifica-se que o desempenho da solução de módulos sem pré-aquecimento do ar de ventilação é muito similar à solução de aplicação de ETICS sendo as diferenças entre ambas desprezáveis do ponto de vista de necessidades de aquecimento.

Sendo assim, as diferenças verificadas nas necessidades de aquecimento entre o ETICS e a aplicação dos módulos com pré-aquecimento do ar de ventilação devem-se exclusivamente ao efeito do pré-aquecimento do ar.

Este facto permite avaliar assim o impacto que o pré-aquecimento do ar de ventilação tem no desempenho térmico da divisão.

Para os climas do Porto e Bragança a fachada com orientação a Sul é aquela onde o pré-aquecimento do ar de ventilação é mais eficaz verificando-se uma diminuição de 50kWh e 58kWh nas necessidades de aquecimento respetivamente.

As fachadas voltadas a Oeste e Este apresentam valores de diminuição das necessidades de aquecimento da mesma grandeza pelo que não devem ser descuradas no uso do pré-aquecimento do ar.

Já para o clima de Évora a fachada a Sul é a que apresenta menor diferença no desempenho do módulo com pré-aquecimento face ao ETICS.

Este valor que difere da tendência verificada nas cidades anteriores deve-se ao facto de na simulação de Évora a temperatura interior da divisão ser mais elevada e durante um maior período de tempo durante o dia, sendo assim as necessidades de aquecimento inferiores.

A temperatura interna é superior pois para este clima na orientação a Sul as temperaturas exteriores mais elevadas aliam-se ao facto de esta orientação apresentar a maior incidência de radiação solar aumentando significativamente os ganhos pela envolvente em relação aos outros climas.

Como já foi verificado anteriormente, a diferença entre as necessidades de aquecimento entre o módulo sem pré-aquecimento e o módulo com pré-aquecimento representa o impacto que o pré-aquecimento do ar teve na diminuição das necessidades de aquecimento.

Tabela 6.5 - Diminuição das necessidades de aquecimento devido ao pré-aquecimento do ar de ventilação [kWh]

	Porto				Bragança				Évora			
Tipo de fachada	Norte	Este	Sul	Oeste	Norte	Este	Sul	Oeste	Norte	Este	Sul	Oeste
4	-32	-45	-53	-43	-33	-48	-60	-49	-31	-42	-31	-42

Sendo assim, é possível determinar qual a influência que o pré-aquecimento do ar tem no aumento do desempenho térmico dos módulos efetuando o seguinte cálculo:

$$\frac{Q_{h_{módulo\ com\ pré-aquecimento}} - Q_{h_{módulo\ sem\ pré-aquecimento}}}{Q_{h_{módulo\ com\ pré-aquecimento}} - Q_{h_{original}}} * 100 \quad (\%) \qquad (6.1)$$

Em que:

Q_h – necessidades para aquecimento [kWh]

Os resultados obtidos encontram-se representados na figura seguinte.

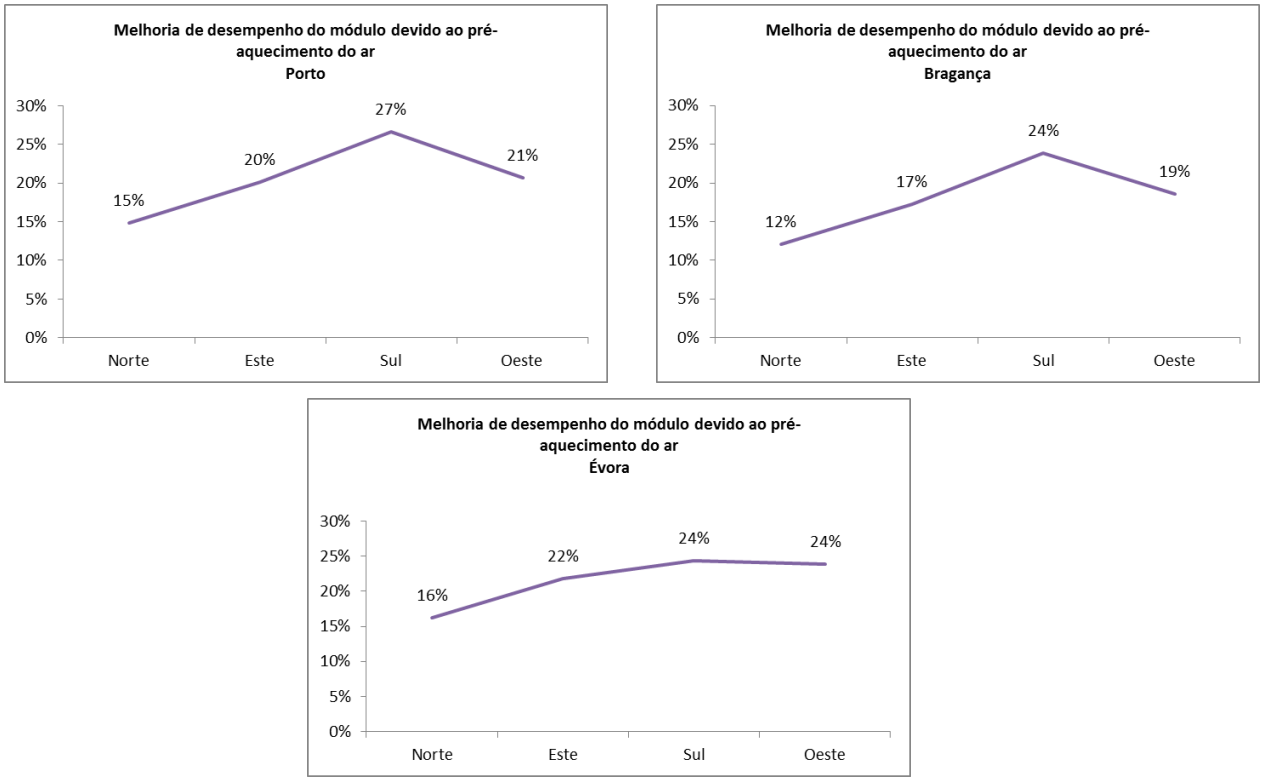


Fig. 6.3 - Melhoria do desempenho do módulo devido ao pré-aquecimento do ar (% da melhoria global)

Analisando a Fig. 6.3 verifica-se que para o clima do Porto e para uma fachada voltada a Sul a fachada em que um módulo possui capacidade de pré-aquecimento do ar de ventilação é 27% mais eficiente na diminuição das necessidades de aquecimento quando comparada com a fachada em que nenhum dos módulos possui essa capacidade.

Para o clima de Bragança esse valor é de 24% sendo que para Évora as orientações Este, Sul e Oeste apresentam performances similares.

Percebe-se assim que a capacidade de pré-aquecimento do ar de ventilação é uma característica importante dos módulos em estudo e a principal característica que os diferencia das soluções de reabilitação mais correntes como por exemplo a aplicação de ETICS.

Será interessante determinar qual o peso da diminuição das necessidades de aquecimento promovida pelo pré-aquecimento do ar na diminuição das necessidades globais.

Para isso foi efetuado o seguinte cálculo

$$\frac{Q_{h_{módulo\ com\ pré-aquecimento}} - Q_{h_{módulo\ sem\ pré-aquecimento}}}{Q_{h_{original}}} * 100 \quad (\%) \qquad (6.2)$$

Em que:

Q_h – necessidades para aquecimento [kWh]

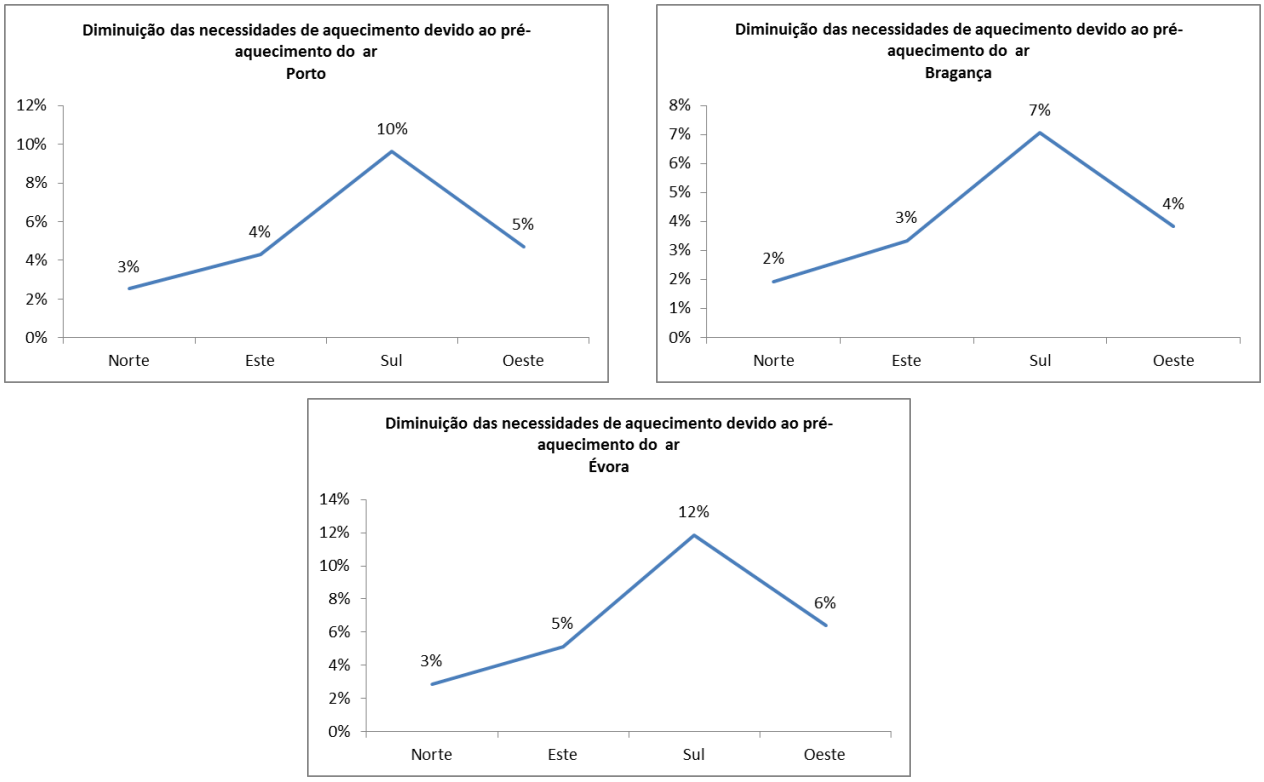


Fig. 6.4 - Diminuição das necessidades de aquecimento devido ao pré-aquecimento do ar

Analisando a Fig. 6.4 verifica-se que para o clima do Porto e orientação Sul, por exemplo, as necessidades de aquecimento na situação original eram de 545 kWh tendo diminuído para 348 kWh após a instalação dos módulos (ver Tabela 6.4) tendo um deles a capacidade de pré-aquecimento do ar de ventilação.

Essa capacidade permite uma diminuição de 53 kWh (ver Tabela 6.5) superior das necessidades de aquecimento face à situação em que todos os módulos se comportam como fachada ventilada tradicional (fachada tipo 3).

Assim sendo, esses 53kWh representam 10% das necessidades de aquecimento originais de 545kWh revelando assim o interesse no pré-aquecimento do ar no aumento do desempenho térmico dos edifícios.

Note-se que apesar de nas outras orientações que não Sul apesar de o pré-aquecimento do ar desempenhar um menor papel na diminuição das necessidades de aquecimento o valor dessas necessidades é superior para essas orientações como é visível na Tabela 6.4 pelo que o pré-aquecimento do ar pode ter um papel a desempenhar a nível de poupanças energéticas sendo necessária uma avaliação económica em maior profundidade de forma a ser possível avaliar os possíveis benefícios a nível térmico com o consequente aumento dos custos de instalação.

6.3.2. Período de arrefecimento

Durante o período de arrefecimento todas as simulações efetuadas apresentam um comportamento térmico semelhante como pode ser verificado na tabela e figura seguinte.

Tabela 6.6 - Necessidades de arrefecimento [kWh]

	Porto				Bragança				Évora			
Tipo de Fachada	Norte	Este	Sul	Oeste	Norte	Este	Sul	Oeste	Norte	Este	Sul	Oeste
1	0	10	13	51	10	81	75	161	93	211	196	303
2	0	12	16	58	11	84	79	163	90	202	188	290
3 e 4	0	10	14	53	10	80	75	155	86	196	182	280

Durante o período de arrefecimento a fachada tipo 3e 4 funcionam de maneira idêntica e possuem as mesmas características, pelo que apresentam os mesmos valores de necessidades de arrefecimento.

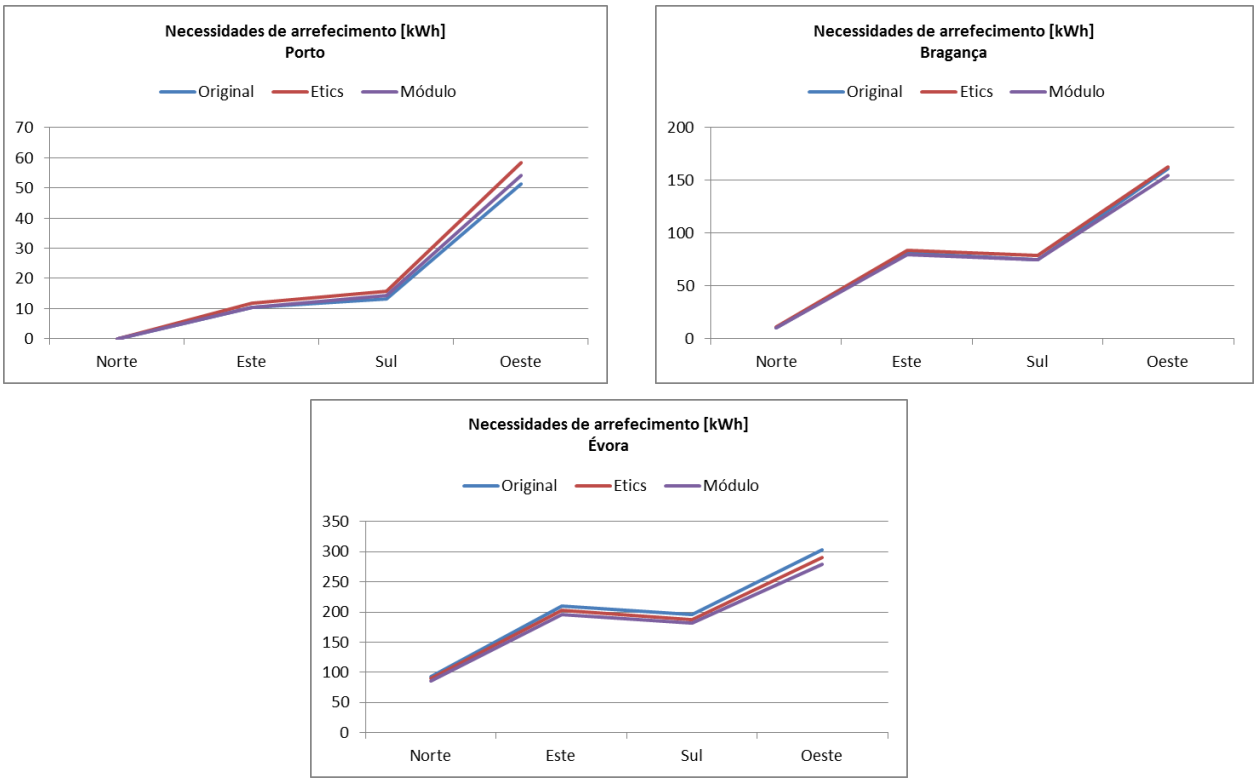


Fig. 6.5 - Necessidades de arrefecimento

Não se verifica assim um aumento significativo das necessidades de arrefecimento devido ao aumento de isolamento da parede de fachada.

A criação de um microclima mais quente no interior da caixa de ar dos módulo parece também não influenciar significativamente o desempenho térmica da habitação durante o período de arrefecimento.

A ocorrência de sobreaquecimento da divisão suscitou preocupação quando se procedeu às simulações acima descritas. No entanto, esse problema não se verificou contribuindo para isso não só a adequada ventilação do espaço mas também a ativação da proteção solar durante o período de arrefecimento que permitiu o controlo da temperatura interna da divisão através da limitação dos ganhos solares.

Os resultados obtidos para a estação de arrefecimento vêm validar a escolha tomada no capítulo 5 relativamente ao período de cálculo durante a estação de arrefecimento.

Nesse capitulo apenas se consideraram os valores compreendidos entre as 9h e 18 h de forma a estudar a influência das diferentes características dos módulos.

Tal escolha revela-se agora acertada tendo em conta os dados obtidos para um período de 24h representados na Fig. 6.5, confirma-se que a consideração de um período de 24h dilui as possíveis diferenças verificadas durante o dia para os diferentes módulos entre os valores noturnos muito similares entre si.

7. Conclusão

7.1 Considerações Finais

Vivemos hoje num tempo de mudança e desafios.

O preço dos combustíveis está em constante subida, o desemprego mantem-se elevado e o mercado da construção, e da construção habitacional em particular, atravessa um período difícil.

É necessário encontrar soluções que permitam o relançamento da economia, do qual o setor da construção é um pivô fundamental, bem como procurar soluções que sejam sustentáveis e obedeçam a uma visão de longo prazo.

Como foi explicado nos no início deste trabalho a aposta na reabilitação urbana traz consigo inúmeros benefícios tanto a nível económico, energético, do nível de vida das populações bem como a nível ambiental.

Portugal possui no seu parque edificado milhares de edifícios que necessitam de obras de reabilitação.

Muitos destes edifícios localizam-se nos centros das cidades estando muitas vezes desocupados e eventualmente ao abandono. São casos pois em que a reabilitação total do edifico é necessária, operação muitas vezes dispendiosa e de difícil execução.

No entanto, muitas vezes as operações de reabilitação são realizadas de uma forma isolada para cada sistema do edifício não sendo tida em conta uma visão integral de todo o edifício como um conjunto de sistemas interligados entre si.

Sugere-se neste trabalho uma mudança de tática, como a adotada pelo projeto IEA Annex 50, onde são privilegiados métodos de reabilitação passíveis de serem padronizados e usando materiais e sistemas de construção pré-fabricados.

Este método de reabilitação de edifícios permitiria um grande aumento no número de execução de obras deste tipo revitalizando a indústria da construção bem como as cidades onde esta ação se realizaria.

Neste trabalho estudou-se o comportamento térmico de uma solução de reabilitação utilizando um painel de fachada constituído por um módulo pré-fabricado.

Este módulo foi idealizado segundos os princípios gerais de uma fachada ventilada mas incorporando no seu funcionamento o pré-aquecimento do ar de ventilação no inverno.

Esta solução permite diminuir as perdas térmicas pela envolvente do edifício através do aumento do isolamento da fachada, bem como diminuir as perdas térmicas verificadas devido ao ar de ventilação.

Realizando-se um estudo paramétrico sobre diferentes características definidoras dos módulos chegou-se à configuração do módulo que será mais eficiente a nível térmico de acordo com o clima Português.

Tratando-se de uma solução de fachada, muitas características do módulo (como o material de placagem e cor) não dependerão apenas do desempenho térmico mas sim também de outros fatores como o comportamento do material e critérios estéticos.

De uma forma geral, e de acordo com critérios de desempenho térmico, a placagem em cerâmico foi aquela que revelou um melhor desempenho do módulo ao longo de todo o ano.

Já a nível da cor da placagem a cor escura é aquela que permite um maior pré-aquecimento do ar de ventilação durante o inverno, no entanto, esta cor poderá causar problemas de sobreaquecimento no verão bem como não ser uma cor esteticamente agradável e de uso corrente em edifícios.

Por isso, sugere-se o uso de uma cor média na placagem do módulo que revelou um desempenho interessante nas simulações realizadas.

Relativamente à espessura da camada isolante do módulo concluiu-se que uma espessura intermédia de 6cm de XPS será a mais vantajosa. Uma espessura menor de 3cm acarreta uma maior perda térmica no inverno enquanto que uma espessura superior não acarreta uma melhoria de desempenho proporcional ao custo acrescido.

A espessura da caixa de ar do módulo é uma característica de estudo e simulação difícil visto envolver fenómenos físicos muito complexos e dependentes de inúmeras variáveis. O programa de simulação utilizado, CAPSOL, não se mostrou sensível à variação deste parâmetro pelo que não puderam ser obtidas conclusões relativamente à espessura da caixa de ar a utilizar no módulo.

Estudou-se a possibilidade de inclusão de uma camada de baixa emissividade (low-e) no interior da caixa de ar do módulo de modo a diminuir as trocas radiativas no seu interior. No entanto esta característica não revelou um contributo significativo na melhoria do comportamento térmico do módulo.

Após a escolha do módulo com as melhores características resultantes do estudo efetuado procedeu-se à simulação da aplicação deste sistema num edifício realizando uma simulação de uma divisão no programa CAPSOL.

Este estudo permitiu verificar que a solução de painel de fachada estudada permite obter um melhor desempenho térmico do edifício revelando-se competitiva e até com um resultado superior à solução mais tradicional de aplicação do sistema de isolamento ETICS.

Este melhor desempenho é especialmente evidente durante a estação de aquecimento em que o pré-aquecimento do ar permitido pelo módulo permite só por si diminuir as necessidades de aquecimento da divisão simulada em 10%, numa fachada voltada a Sul.

Este estudo permitiu mostrar as potencialidades, e também fragilidades, do sistema de reabilitação de fachada através do uso de módulo pré-fabricados.

Espera-se que com as conclusões aqui apresentadas se motive a pesquisa e novos desenvolvimentos neste campo bem como na reabilitação urbana em geral.

7.1 POSSIBILIDADES DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

Sendo a eficiência energética e sustentabilidade o grande objetivo do estudo realizado sobre o uso de módulos pré-fabricados na reabilitação de fachadas seria extremamente interessante em investigações

futuras estudar a incorporação de painéis fotovoltaicos ou mesmo de coletores solares cujo princípio é similar ao pré-aquecimento do ar estudado neste trabalho..

Este estudo focou-se na simulação de painéis de fachada opacos, no entanto, tendo em conta os bons resultados obtidos a nível do contributo do pré-aquecimento no melhoramento do desempenho térmico do edifício sugere-se a possibilidade do aprofundamento do estudo de uso de módulos com placagem em envidraçado de forma a potenciar o pré-aquecimento do ar durante o inverno, precavendo-se obviamente o seu comportamento em situação de verão.

Nas simulações efetuadas neste estudo assumiu-se que o caudal de ventilação durante o inverno seria constante e que o módulo permitiria, através de um sistema de abertura e fecho de grelha de ventilação, alterar o seu comportamento relativo à circulação do ar.

Estas foram premissas teóricas assumidas mas considera-se relevante o estudo de um sistema que permita a integração de um dispositivo mecânico de circulação de ar no interior do módulo, potencialmente alimentado a energia solar, bem como de um sistema automático ou manual que permita a alteração da configuração do módulo fazendo com que o ar de ventilação percorra a caixa de ar do módulo entrando para o interior da habitação durante o inverno mas que no verão o módulo se comporte como uma fachada ventilada tradicional não admitindo ar para o espaço interior, ou até mesmo um sistema cujo comportamento varie automaticamente consoante a temperatura na caixa de ar do módulo ou outro parâmetro relevante.

Usando este estudo como ponto de partida considera-se também interessante a simulação do módulo sugerido em programas de simulação de maior complexidade que permitam um estudo mais aprofundado dos fenómenos físicos em causa.

Além do estudo através de simulações sugere-se a realização de ensaios em laboratório sobre um modelo físico do módulo de forma a validar os resultados obtidos.

BIBLIOGRAFIA

Couto, Armanda Bastos - Vantagens Produtivas e Ambientais da Pré-Fabricação. Universidade do Minho, 2007.

CPCI - Impactos da Criação de uma Taxa Liberatória no Arrendamento. CPCI, 2011.

CYPE - Gerador de Preços. consultado em 20/01/2012.

Diário da República - Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de abril Lisboa: Imprensa Nacional-Casa da Moeda, 2006. 0870-9963

Diário da República - Decreto-Lei n.º 307/2009 - Diário da República, 1.ª série — N.º 206 — 23. 2009.

Euroconstruct - Eurocontruct Country Report. Eurocontruct, 2009.

Faria, Jose Amorim - Pré-fabricação - Noções Gerais. 2004.

FEPICOP - Relatório FEPICOP da construção 2009/2010. 2010.

Henrique, F - Reabilitação Térmica de Edifícios. Alambi, 2007.

IEA ECBCS - Retrofit Module Design Guide. 2010.

IEA ECBCS - Annex 50 Project Factsheet. 2011a.

IEA ECBCS - The ECBCS Research Programme. IEA, 2011b.

IEA ECBCS - Retrofit Strategies Design Guide. 2011c.

INE - Inquérito de qualidade: Censos 2001 XIV recenseamento geral da população: IV recenseamento geral da habitação. Lisboa:: INE, 2001.

Ministério das Obras Publicas Transporte e Habitação - O Setor da Habitação no Ano de 2003. Secretaria de Estado da Habitação. Instituto Nacional de Habitação, 2004.

Physibel - CAPSOL, v.4.0 Computer Program to Calculate Multizonal Transient Heat Transfer. 2002.

Physibel - Physibel Software Pilot Book - Practical problems solved using the Physibel Software. 2004.

Sousa, Hipólito José Campos de - Melhoria do comportamento térmico e mecânico das alvenarias por atuação na geometria dos elementos aplicação a blocos de betão de argila expandida. Porto: [s. n.], 1996.

Sousa, Joana Raquel Bastos - Potencial da aplicação de sistemas pré-fabricados na reabilitação térmica de fachadas. Porto: [s. n.], 2010.