



**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Civil**

# **Caracterização Experimental e Numérica do Desempenho Térmico de um Edifício “Gaioleiro”**

## **Identificação de Oportunidades de Melhoria**

**MÁRIO RUI SANTANA MAMEDE**

Licenciado em Engenharia Civil

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Área de Especialização em Edificações

Orientador (es):

Doutor Armando Teófilo dos Santos Pinto (LNEC)  
Licenciada Maria Alexandra Cardoso da Costa (ISEL)

Júri:

Presidente: Doutor Filipe Manuel Vaz Pinto Almeida Vasques (ISEL)

Vogais:

Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho (FEUP)  
Doutor Armando Teófilo dos Santos Pinto (LNEC)  
Licenciada Maria Alexandra Cardoso da Costa (ISEL)

**Janeiro de 2012**





**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Civil**

# **Caracterização Experimental e Numérica do Desempenho Térmico de um Edifício “Gaioleiro”**

## **Identificação de Oportunidades de Melhoria**

**MÁRIO RUI SANTANA MAMEDE**

Licenciado em Engenharia Civil

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Área de Especialização em Edificações

**Orientador (es):**

Doutor Armando Teófilo dos Santos Pinto (LNEC)  
Licenciada Maria Alexandra Cardoso da Costa (ISEL)

**Júri:**

Presidente: Doutor Filipe Manuel Vaz Pinto Almeida Vasques (ISEL)

Vogais:

Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho (FEUP)  
Doutor Armando Teófilo dos Santos Pinto (LNEC)  
Licenciada Maria Alexandra Cardoso da Costa (ISEL)

**Janeiro de 2012**



# Caracterização Experimental e Numérica do Desempenho Térmico de um Edifício “Gaioleiro”. Identificação de Oportunidades de Melhoria

## RESUMO

O sector dos edifícios é responsável por uma percentagem significativa dos consumos de energia primária e de energia eléctrica em Portugal, associada principalmente ao conforto térmico dos seus ocupantes. A União Europeia pretende uma redução de 20%, até 2020, dos consumos de energia e consequentes emissões de CO<sub>2</sub> através da melhoria da eficiência energética dos edifícios públicos e residenciais. Em Portugal, o Plano Nacional para a Eficiência Energética (PNAEE) tem por objectivo obter uma poupança anual de energia de pelo menos 1% até ao ano de 2016, tomando como base a média de consumos de energia final, registados entre 2001 e 2005. Neste contexto, os edifícios anteriores a 1990 (primeira versão do RCCTE) podem apresentar um potencial significativo de melhoria da sua eficiência energética com base na sua reabilitação.

Os edifícios “Gaioleiros” (1880 – 1930) constituindo uma parte importante do património histórico da cidade de Lisboa, para os quais a informação sobre o seu desempenho térmico é limitada, considerou-se pertinente efectuar um estudo destinado à sua caracterização experimental e numérica, face à especificidade do comportamento térmico das suas paredes caracterizadas pela elevada espessura.

No presente trabalho, apresenta-se a metodologia e os resultados experimentais da medição da resistência térmica das paredes e da medição das necessidades térmicas de aquecimento da habitação. Estes resultados experimentais foram utilizados na validação do modelo de simulação térmica da habitação, que posteriormente serviu para avaliar as suas necessidades térmicas de aquecimento ( $N_{ic}$ ) e de arrefecimento ( $N_{vc}$ ), identificar oportunidades de melhoria e avaliar o respectivo potencial de reabilitação.

Neste trabalho, como contributos para uma reabilitação sustentável, apresentam-se avaliações de oportunidades de melhoria com base em estratégias de reforço do isolamento térmico. Dos resultados obtidos concluiu-se que melhorando o isolamento térmico das paredes e vãos envidraçados é possível baixar consideravelmente os consumos de energia associados à habitação, cumprindo assim as exigências estabelecidas no RCCTE ao nível dos requisitos de qualidade térmica da envolvente e consumos energéticos para edifícios novos e grandes reabilitações.

**Palavras-chave:** Edifício “Gaioleiro”; Eficiência energética; Avaliação experimental; Fluxímetro; Desempenho térmico; Modelo térmico; RCCTE; Transmissão de calor; Reabilitação térmica; Isolamento térmico.



# Experimental and Numerical Characterization of the Thermal Performance of a Building "Gaioleiro". Identification of Improvement Opportunities in Rehabilitation

## ABSTRACT

The building sector is responsible for a significant proportion of the consumption of primary energy and electricity in Portugal, mainly associated to the thermal comfort of their occupants. The European Union wants a 20% reduction by 2020, of the energy consumption and consequent CO<sub>2</sub> emissions by improving energy efficiency in public and residential buildings. In Portugal, the National Plan for Energy Efficiency (PNAEE) aims to achieve an annual energy savings of at least 1% by the year 2016, based on the average final energy consumption, recorded between 2001 and 2005. In this context, the buildings prior to 1990 (first version of RCCTE) may present a significant potential for improving its energy efficiency based on their rehabilitation

The buildings "Gaioleiros" (1880 - 1930) constitutes an important part of the historic city of Lisbon, for which the information on the thermal performance is limited, it was considered pertinent to carry out a study of its experimental characterization and numerical given the specificity of their thermal behavior characterized by its thick walls .

In this paper, we present the methodology and results of experimental measurement of thermal resistance of walls and measurement of thermal heating needs for the housing. These experimental results were used to validate the thermal simulation model of the housing, which later served to assess your needs thermal heating needs ( $N_{ic}$ ) and cooling ( $N_{vc}$ ), identify opportunities for improvement and assess its potential for rehabilitation.

In this work, as a contribution for a sustainable rehabilitation, we present evaluations of opportunities for improvement based on strategies for enhancing the thermal insulation. From the results it was concluded that improving the thermal insulation of walls and glazed openings it is significantly possible to lower energy consumption associated with the housing, thus fulfilling the requirements of RCCTE level of quality requirements of the thermal environment and energy consumption for new buildings and major rehabilitation.

**Keywords:** Building "Gaioleiro"; Energy efficiency; Experimental evaluation; Flowmeters; Thermal performance; Thermal model; RCCTE; Heat transmission; Thermal rehabilitation; Thermal insulation.



## AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que pelos seus ensinamentos, valores e orientações ao longo da vida me fizeram ser aquilo que sou hoje, que me ajudaram a percorrer este caminho e a cumprir um dos meus grandes objectivos de vida.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela oportunidade de estágio para a realização do presente trabalho final de mestrado e por me ter sido disponibilizado todos os equipamentos necessários à sua realização.

Ao Fundo de Investimento Fechado Sete Colinas e ao Arquitecto Fernando Gaio as condições proporcionadas para a realização deste trabalho.

A todos os técnicos do Núcleo de Acústica, Iluminação, Componentes e Instalações (NAICI) pela sua total disponibilidade em colaborar neste trabalho, nomeadamente ao Sr<sup>o</sup>. José Martins, ao Sr<sup>o</sup>. Luís Costa, ao Sr<sup>o</sup>. Carlos Saldanha, à Sr<sup>a</sup>. Rosa Soares e finalmente ao Engenheiro Hildebrando Cruz pelo auxílio na calibração e configuração dos equipamentos.

Ao Filipe Silva pelo apoio, ajuda e total disponibilidade, estando sempre presente nos momentos mais difíceis deste trabalho.

Ao meu orientador científico, Doutor Armando Pinto pelo tempo e empenho que dedicou a este trabalho, pelo constante encorajamento na resolução dos mais diversos problemas e pela dedicação permanente que demonstrou ao longo de todo o processo que se revelou vital para concluir este trabalho com os resultados pretendidos.

À minha co-orientadora Engenheira Alexandra Costa pela oportunidade que me deu em realizar este trabalho e pela total disponibilidade de revisão do mesmo, enriquecendo-o com o seu conhecimento nas diferentes matérias.

Ao Fábio Loução e ao Ricardo Costa, amigos e companheiros nas horas mais difíceis que pautaram as várias etapas do curso.

À minha família e amigos pelo apoio e compreensão durante a realização deste trabalho que me levou a estar afastado da sua companhia durante os últimos meses.

À Filipa, cujo amor e a sua simples presença foram para mim uma inspiração para ultrapassar todas as adversidades ao longo dos últimos anos e chegar finalmente ao fim desta etapa.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa pela oportunidade que me foi concedida em formar-me como Engenheiro Civil, preparando-me convenientemente para as etapas profissionais que certamente surgiram no futuro.



# ÍNDICE DO TEXTO

<b>RESUMO .....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DO TEXTO.....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS .....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>SIGLAS E ACRÓNIMOS .....</b>	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento e Relevância do Tema .....	1
1.2. Objectivos.....	2
1.3. Metodologia.....	3
1.4. Estrutura do Trabalho .....	3
<b>2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>7</b>
2.1. Edifícios “Gaioleiros” .....	7
2.1.1. Evolução dos Edifícios na Cidade de Lisboa .....	7
2.1.2. História do Edifício “Gaioleiro” .....	9
2.1.3. Caracterização do Edifício “Gaioleiro” .....	12
2.1.4. Constrangimentos à Reabilitação das Fachadas de Edifícios Históricos.....	14
2.2. Eficiência Energética em Edifícios de Habitação.....	17
2.2.1. Aspectos Condicionantes do Desempenho Energético dos Edifícios.....	23
2.2.2. Conforto Térmico .....	27
2.3. Fenómenos de Transmissão de calor .....	29
2.3.1. Condução.....	30
2.3.2. Convecção .....	32
2.3.3. Radiação .....	33
2.4. Ensaio para Avaliação do Comportamento Térmico dos Edifícios .....	34
2.4.1. Net Energy Input Method.....	34
2.4.2. Termografia .....	35
2.4.3. Ensaio de Pressurização.....	37

2.5.	Determinação Experimental do Coeficiente de Transmissão Térmica ( $U$ ).....	39
2.5.1.	Medição do Coeficiente De Transmissão Térmica - Edifícios Tradicionais.....	39
2.5.2.	Avaliação do Comportamento Térmico de Edifícios de Habitação .....	40
2.5.3.	Fontes de Erro na Medição Experimental do $U$ .....	40
<b>3.</b>	<b>DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO ESTUDADO .....</b>	<b>43</b>
3.1.	Aspectos Gerais .....	43
3.2.	Localização do Edifício e Clima .....	43
3.3.	Caracterização das Soluções Construtivas .....	46
3.4.	Caracterização Dimensional da Habitação Estudada .....	51
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>53</b>
4.1.	Aspectos Gerais .....	53
4.2.	Determinação da Resistência Térmica das Paredes – Método do Fluxímetro .....	53
4.2.1.	Equipamentos.....	54
4.2.2.	Condições de Realização dos Ensaios.....	56
4.2.3.	Tratamento de Resultados - Método Médio de Cálculo.....	59
4.2.4.	Tratamento de Resultados - Efeito do Armazenamento Térmico .....	60
4.3.	Avaliação Experimental das Necessidades de Aquecimento – Método do Aquecimento.....	62
4.3.1.	Equipamentos.....	62
4.3.2.	Condições para a Realização dos Ensaios.....	64
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>67</b>
5.1.	Aspectos Gerais .....	67
5.2.	Determinação da Resistência Térmica da Parede 1 (0,74 m) – Método do Fluxímetro... .....	67
5.2.1.	Resultados Experimentais .....	67
5.2.2.	Tratamento dos Resultados .....	70
5.2.2.1.	Correcção do Fluxo - Efeito de Armazenamento Térmico.....	70
5.2.2.2.	Aplicação do método Médio – Cálculo da Resistência Térmica ( $R$ ).....	72
5.2.2.3.	Verificação do Critério de Paragem do Ensaio.....	73
5.3.	Determinação da Resistência Térmica da Parede 2 (0,27 m) – Método do Fluxímetro	74
5.3.1.	Resultados Experimentais .....	74

5.3.2.	Tratamento dos Resultados.....	76
5.3.2.1.	Correcção do Fluxo - Efeito de Armazenamento Térmico .....	76
5.3.2.2.	Aplicação do método Médio – Cálculo da Resistência Térmica ( $R$ ) .....	77
5.3.2.3.	Verificação do Critério de Paragem do Ensaio .....	79
5.4.	Transmissão de Calor na Parede em Regime Dinâmico.....	79
5.4.1.	Desenvolvimento e Implementação do Método .....	79
5.4.2.	Cálculo das Resistências Térmicas Superficiais.....	82
5.4.3.	Resultados Finais.....	87
5.5.	Avaliação Experimental das Necessidades de Aquecimento – Método do Aquecimento. ....	91
5.5.1.	Resultados Experimentais .....	91
<b>6.</b>	<b>MODELO TÉRMICO DA HABITAÇÃO - VALIDAÇÃO .....</b>	<b>95</b>
6.1.	Modelo de Simulação Térmica da Habitação – Modelo de Regime Estacionário – Condições de Ensaio .....	95
6.1.1.	Balço Térmico Global da Habitação.....	95
6.1.2.	Perdas por Renovação do Ar Interior .....	96
6.1.3.	Perdas Superficiais pela Envolvente Exterior .....	96
6.1.4.	Perdas por Pontes Térmicas.....	98
6.1.5.	Perdas Superficiais pela Envolvente Interior.....	100
6.1.6.	Ganhos Solares pelos Envidraçados e pelas Paredes.....	101
6.1.7.	Necessidades Térmicas de Aquecimento .....	104
6.2.	Validação do Modelo Térmico .....	105
<b>7.</b>	<b>APRECIACÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA HABITAÇÃO ....</b>	<b>107</b>
7.1.	Aspectos Gerais.....	107
7.2.	Apreciação do Comportamento Térmico da Habitação face ao RCCTE .....	107
7.2.1.	Descrição dos Casos Avaliados.....	107
7.2.2.	Método de Cálculo de $N_{ic}$ e Delimitação da Habitação .....	108
7.2.2.1.	Perdas por Renovação do Ar Interior.....	109
7.2.2.2.	Perdas Superficiais pela Envolvente Exterior .....	109
7.2.2.3.	Perdas por Pontes Térmicas .....	111
7.2.2.4.	Perdas pela Envolvente Interior .....	113

7.2.2.5.	Ganhos na Estação de Aquecimento.....	113
7.2.2.6.	Necessidades Nominais de Aquecimento - $N_{ic}$ .....	115
7.2.2.7.	Efeito da Radiação Solar nas Perdas Térmicas da Envolvente Opaca .....	118
7.2.3.	Método de Cálculo de $N_{vc}$ e Delimitação da Habitação .....	120
7.2.3.1.	Perdas Térmicas.....	121
7.2.3.2.	Ganhos Térmicos.....	122
7.2.3.3.	Necessidades Térmicas de Arrefecimento.....	124
7.3.	Avaliação de Oportunidades de Melhoria.....	125
7.3.1.	Propostas de Reabilitação - Paredes.....	125
7.3.1.1.	Descrição das Soluções .....	126
7.3.1.2.	Poupança energética e viabilidade económica – Análise de Resultados .....	127
7.3.2.	Propostas de Reabilitação de Vãos Envidraçados.....	132
7.3.2.1.	Descrição das soluções .....	132
7.3.2.2.	Poupança energética e viabilidade económica .....	134
7.3.3.	Propostas de Soluções Finais e Análise de Resultados .....	138
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>141</b>
8.1.	Conclusões Gerais.....	141
8.2.	Sugestões de Trabalhos Futuros.....	144
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>145</b>
	<b>ANEXO A – DESENHOS AUXILIARES .....</b>	<b>A.1</b>
	<b>ANEXO B – CALIBRAÇÃO DOS APARELHOS DE MEDIDA .....</b>	<b>B.1</b>
	<b>ANEXO C – TEMPERATURAS DAS HABITAÇÕES ENVOLVENTES .....</b>	<b>C.1</b>
	<b>ANEXO D – AUXILIAR DE CÁLCULOS (MÉTODO DO FLUXÍMETRO) .....</b>	<b>D.1</b>
	<b>ANEXO E – CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA (U) ASSOCIADOS À DETERMINAÇÃO DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS .....</b>	<b>E.1</b>
	<b>ANEXO F – VALORES DE MASSA TÉRMICA UTILIZADA NO CÁLCULO DA INÉRCIA TÉRMICA DA HABITAÇÃO.....</b>	<b>F.1</b>
	<b>ANEXO G – INFLUÊNCIA SOLAR NA ENVOLVENTE EXTERIOR E FACTORES DE SOMBREAMENTO.....</b>	<b>G.1</b>

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Distribuição dos edifícios de Lisboa pelas principais tipologias construtivas .....	9
Quadro 2.2 - Aplicação dos regulamentos térmicos a edifícios de habitação .....	22
Quadro 2.3 - Coeficientes de transmissão térmica máximos e de referência .....	25
Quadro 2.4 - Factores que condicionam o conforto térmico .....	28
Quadro 3.1 - Valores médios de temperatura do ar exterior e radiação solar .....	46
Quadro 3.2 – Características térmicas de materiais dos elementos da envolvente.....	50
Quadro 3.3 - Massa térmica dos elementos (M <sub>si</sub> ).....	51
Quadro 3.4 - Classe da inércia térmica.....	51
Quadro 3.5 - Área útil de pavimento e envolvente exterior e interior.....	52
Quadro 4.1 - Características dos termopares tipo T .....	55
Quadro 5.1 - Características térmicas teóricas da parede 1 (0,74 m de espessura) .....	70
Quadro 5.2 - Características gerais da parede 1 estudada .....	70
Quadro 5.3 - Características térmicas - Parede 1.....	73
Quadro 5.4 - Critério de paragem 1 .....	74
Quadro 5.5 - Critério de paragem 2.....	74
Quadro 5.6 - Critério de paragem 3.....	74
Quadro 5.7 - Características térmicas teóricas da parede 2 (0,27 m de espessura) .....	76
Quadro 5.8 - Características gerais da parede 2 estudada .....	76
Quadro 5.9 - Características térmicas - Parede 2.....	78
Quadro 5.10 - Critérios de paragem do ensaio - Parede 2.....	79
Quadro 5.11 - Valores utilizados para o cálculo de h <sub>ci</sub> .....	84
Quadro 5.12 - Resultados calculados para factores de forma.....	86
Quadro 5.13 - Temperaturas médias .....	92
Quadro 6.1 - Resistências térmicas superficiais .....	97
Quadro 6.2 - Perdas superficiais pela envolvente exterior .....	97
Quadro 6.3 – Perdas pela envolvente em contacto com o exterior (análise bidimensional) .....	99
Quadro 6.4 - Pontes térmicas lineares .....	100
Quadro 6.5 - Coeficiente de redução de perdas ( $\tau$ ) para espaços não climatizados .....	101
Quadro 6.6 - Perdas térmicas pela envolvente interior.....	101
Quadro 6.7 - Ganhos solares brutos pelos envidraçados .....	102
Quadro 6.8 - Ganhos solares pelas paredes de fachada (NO e SE) .....	103
Quadro 6.9 - Efeito do sol nas perdas térmicas da envolvente exterior .....	104
Quadro 6.10 – Necessidade Brutas de Aquecimento - Piso 2 .....	104
Quadro 6.11 - Validação do modelo térmico da habitação .....	105
Quadro 7.1 - Perdas térmicas pela envolvente exterior ( $N_{ic}$ ).....	110

Quadro 7.2 – Perdas pela envolvente em contacto com o exterior (análise bidimensional).....	111
Quadro 7.3 - Pontes térmicas lineares (Valores de ensaio).....	111
Quadro 7.4 - Pontes térmicas lineares (valores convencionais).....	112
Quadro 7.5 - Perdas térmicas pela envolvente interior ( $N_{ic}$ ) .....	113
Quadro 7.6 – Cálculo da área efectiva de envidraçado ( $N_{ic}$ ).....	115
Quadro 7.7 – Balanço térmico da habitação ( $N_{ic}$ ) .....	116
Quadro 7.8 - Necessidades nominais de aquecimento ( $N_{ic}$ ).....	116
Quadro 7.9 - Necessidades de aquecimento (GD 17) .....	117
Quadro 7.10 - Ganhos térmicos pela parede ( $N_{ic}$ ).....	119
Quadro 7.11 - Efeito do sol no U das paredes ( $N_{ic}$ ) .....	119
Quadro 7.12 - Perdas térmicas associadas à habitação ( $N_{vc}$ ).....	121
Quadro 7.13 – Ganhos térmicos pela envolvente opaca exterior ( $N_{vc}$ ) .....	122
Quadro 7.14 - Cálculo dos ganhos solares – vãos envidraçados ( $N_{vc}$ ).....	123
Quadro 7.15 - Ganhos térmicos totais ( $N_{vc}$ ).....	124
Quadro 7.16 - Necessidades Nominiais de Arrefecimento ( $N_{vc}$ ) .....	124
Quadro 7.17 - Características dos isolamentos térmicos .....	127
Quadro 7.18 - Variação da área útil de pavimento e inércia térmica .....	127
Quadro 7.19 - Custo máximo para período de retorno até 8 anos – reabilitação paredes.....	131
Quadro 7.20 - Preços unitários para isolamentos de paredes.....	131
Quadro 7.21 - Características térmicas dos vãos envidraçados .....	134
Quadro 7.22 - Custo máximo para período de retorno até 8 anos – reabilitação vãos envidraçados .....	137
Quadro 7.23 - Preços unitários para vãos envidraçados .....	138
Quadro 7.24 - Combinação de soluções – Paredes e vãos envidraçados .....	138
Quadro 7.25 - Redução do consumo energético da aplicação das medidas de melhoria (%) .....	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Localização das tipologias construtivas na cidade de Lisboa.....	8
Figura 2.2 - Evolução das tipologias construtivas - Pombalino e "Gaioleiro" .....	9
Figura 2.3 - Vista de Lisboa antes do terramoto (superior) e depois do terramoto (inferior).....	10
Figura 2.4 - Projecto de reconstrução da baixa de Lisboa.....	10
Figura 2.5 - Gaiola Pombalina.....	11
Figura 2.6 - Volume populacional na cidade de Lisboa (1864 - 1930) .....	12
Figura 2.7 – Corte de edifício tipo “Gaioleiro” e elementos caracterizadores .....	14
Figura 2.8 - Evolução da dependência Europeia na importação de energia primária .....	20
Figura 2.9 - Gráfico do consumo de energia primária.....	20
Figura 2.10 - Gráfico do consumo de energia eléctrica.....	21
Figura 2.11 – Incidência solar Inverno: a) Fachada Sul; b) Fachada Sudeste .....	25
Figura 2.12 – Incidência solar Verão: a) Fachada Sul; b) Fachada Este .....	26
Figura 2.13 - Graus dia em função da temperatura (1995).....	29
Figura 2.14 - Condução do calor em regime permanente e fluxo unidireccional.....	30
Figura 2.15 - Camada limite cinética em convecção natural.....	33
Figura 2.16 – Exemplo de termograma de cores: a) Fotografia normal; b) Fotografia térmica ..	37
Figura 2.17 - Ensaio da porta ventiladora .....	38
Figura 3.1 - Localização do edifício estudado: a) Planta; b) Fotografia aérea .....	44
Figura 3.2 - Planta da cidade de Lisboa e de Belém (1834) .....	44
Figura 3.3 - Zonamento climático de Portugal Continental (Inverno e Verão).....	45
Figura 3.4 - Fachadas do edifício estudado: a) Principal; b) Tardoz; c) Saguão.....	47
Figura 3.5 - Constituição das paredes: a) Piso de esteira (0,90 m); b) Saguão (0,74 m); c) Saguão (0,27 m) .....	47
Figura 3.6 – Paredes de compartimentação: a) Parede de frontal; b) Parede de tabique.....	48
Figura 3.7 – Janelas características do piso 2: a) Sacada; b) Peitoril; c) Casa de banho .....	48
Figura 3.8 – Pavimento de madeira: a) Face superior; b) Face inferior .....	49
Figura 3.9 – Tecto característico das fracções: a) Acabamento em estuque; b) Acabamento em pranchas de madeira .....	49
Figura 3.10 - Caixa de Escadas: a) Escadas de Madeira; b) Clarabóia; c) Grelhas de admissão de ar.....	50
Figura 3.11 - Planta da habitação do piso 2 estudada.....	52
Figura 4.1 - Fluxímetro - Área de medição .....	54
Figura 4.2 – Representação dos termopares do tipo T .....	55
Figura 4.3 - Equipamento de aquisição de dados – datataker.....	56

Figura 4.4 - Montagem dos fluxímetros parede 1: a) Paramento interior; b) Paramento exterior .....	57
Figura 4.5 - Montagem dos fluxímetros parede 2: a) Paramento interior; b) Paramento exterior .....	57
Figura 4.6 - Posicionamento dos equipamentos de medição: a) Parede 1 (0,74 m); b) Parede 2 (0,27 m).....	58
Figura 4.7 - Montagem do Termopar.....	58
Figura 4.8 - Equipamentos de temperatura: a) Aquecedor; b) Termo-ventilador; c) Sensor de temperatura .....	63
Figura 4.9 - Equipamentos de energia: a) Medidor de Consumo; b) Termóstato .....	63
Figura 4.10 – Equipamento de medição da radiação solar - Piranómetro.....	64
Figura 4.11 – Método do aquecimento: a) Disposição dos aquecedores; b) Medidor de consumo; c) Termóstato .....	65
Figura 4.12 – Método do aquecimento: a) Piranómetro; b) Sensor de temperatura .....	66
Figura 5.1 - Gráfico do comportamento dos fluxos de calor - parede 1 (0,74 m).....	68
Figura 5.2 - Sentido do fluxo de calor medido pelos fluxímetros.....	69
Figura 5.3 - Processo de divisão da parede .....	71
Figura 5.4 - Gráfico de comparação entre fluxo medido e fluxo corrigido – parede 1 (0,74 m)	71
Figura 5.5 - Gráfico do cálculo da resistência térmica (R) - parede 1 (0,74 m).....	72
Figura 5.6 – Gráfico do comportamento dos fluxos de calor - parede 2 (0,27 m).....	75
Figura 5.7 - Gráfico de comparação entre fluxo medido e fluxo corrigido – parede 2 (0,27 m)	77
Figura 5.8 - Gráfico do cálculo da resistência térmica (R) - parede 2 (0,27 m).....	78
Figura 5.9 - Condução uni-dimensional do fluxo de calor.....	80
Figura 5.10 - Cálculo do produto matricial utilizando o <i>software Excel</i> .....	81
Figura 5.11 - Legenda da envolvente do compartimento 1.....	85
Figura 5.12 - Gráfico das temperaturas da envolvente opaca .....	85
Figura 5.13 - Gráfico da temperatura das camadas interiores - parede 1 (0,74 m).....	87
Figura 5.14 - Gráfico de comparação entre temperaturas superficiais - parede 1 (0,74 m).....	88
Figura 5.15 – Gráficos do processo de aquecimento da parede 1: Abcissas - Número de nós; Ordenadas - Temperatura.....	89
Figura 5.16 - Gráfico das temperaturas das camadas interiores - parede 2 (0,27 m).....	89
Figura 5.17 - Gráfico de comparação entre temperaturas superficiais - parede 2 (0,27 m).....	90
Figura 5.18 - Gráficos do processo de aquecimento da parede 2: Abcissas - Número de nós; Ordenadas - Temperatura.....	91
Figura 5.19 - Gráfico de monitorização das temperaturas .....	91
Figura 5.20 - Gráfico dos ganhos solares pelo vidro simples incolor na fachada Sudeste .....	92
Figura 5.21 - Gráfico da energia consumida ao longo do período de ensaio .....	93

Figura 6.1 – Perdas e Ganhos de calor pelas envoltentes consideradas – Condições de ensaio.	95
Figura 6.2 - Comportamento térmico da habitação por níveis (condições de ensaio).....	98
Figura 6.3 – Exemplo do comportamento bidimensional das linhas de fluxo (PTL).....	99
Figura 6.4 – Pontes térmicas lineares: Ligação a) Pavimento c/parede (0,27 m); b) Pavimento c/ parede (0,77 m); c) Fachada c/ Varanda; d) Parede c/ vão da janela.....	99
Figura 6.5 - Gráfico da influência da radiação solar nas paredes de fachada (NO e SE).....	103
Figura 7.1 - Perdas e Ganhos de calor pelas envoltentes consideradas ( $N_{ic}$ ).....	109
Figura 7.2 - Gráfico das necessidades de aquecimento ( $N_{ic}$ ).....	120
Figura 7.3 - Perdas e ganhos de calor pelas envoltentes consideradas ( $N_{vc}$ ).....	121
Figura 7.4 - Gráfico da influência no consumo energético – Reabilitação paredes (Inverno).....	128
Figura 7.5 - Gráfico das necessidades nominais de aquecimento - Reabilitação paredes ( $N_{ic}$ ). .....	128
Figura 7.6 - Gráfico da influência no consumo energético - Reabilitação paredes (Verão).....	129
Figura 7.7 - Gráfico das necessidades nominais de arrefecimento - Reabilitação paredes ( $N_{vc}$ )... .....	129
Figura 7.8 - Gráfico da influência no consumo energético – Reabilitação vãos envidraçados (Inverno).....	134
Figura 7.9 - Gráfico das necessidades nominais de aquecimento – Reabilitação vãos envidraçados ( $N_{ic}$ ).....	135
Figura 7.10 - Gráfico da influência no consumo energético – Reabilitação vãos envidraçados (Verão).....	136
Figura 7.11 - Gráfico das necessidades nominais de arrefecimento – Reabilitação vãos envidraçados ( $N_{vc}$ ).....	136
Figura 7.12 - Gráfico das necessidades energéticas - soluções de reabilitação.....	139



## SIGLAS E ACRÓNIMOS

GEE – Gases com Efeito de Estufa

DGEG – Direcção Geral de Energia e Geologia

INETI – Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da qualidade do Ar Interior nos Edifícios

PNAEE – Plano Nacional para a Eficiência Energética

THERM – Two-Dimensional Building Heat-Transfer Modeling

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MW – Lã de Rocha

XPS – Poliestireno expandido extrudido

PTL – Pontes Térmicas Lineares

PDM – Plano Director Municipal

PP – Plano de Pormenor

GD – Numero de graus dia de aquecimento na base dos 20 °C (°C·dia)

R – Resistência térmica ( $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ )

U – Coeficiente de transmissão térmica ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$\lambda$  – Condutibilidade térmica equivalente ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )

A – Área ( $\text{m}^2$ )

$T_{se}$  – Temperatura superficial exterior (°C)

$T_{si}$  – Temperatura superficial interior (°C)

$T_e$  – Temperatura exterior (°C)

$T_i$  – Temperatura interior (°C)

q – Fluxo de calor ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$F_i$  – Factor de massa térmica interior ( $\text{j} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$F_e$  – Factor de massa térmica exterior ( $\text{j} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$C_p$  – Calor específico dos materiais ( $\text{j} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$\rho$  – Densidade dos materiais ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$C_k$  – Capacidade térmica dos materiais ( $\text{j} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )

Fo – Forma das diferenças finitas no número de Fourier

Bi – Número de Biot

$h_c$  – Condutância térmica superficial de convecção, ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$h_r$  – Condutância térmica superficial de radiação, ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )

Nu – Número de Nusselt

Ra – Número de Rayleigh

Pr – Número de Prandtl

F<sub>ij</sub> – Factor de forma entre a superfície i e j

R<sub>se</sub> – Resistência térmica superficial exterior ( $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ )

R<sub>si</sub> – Resistência térmica superficial interior ( $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ )

N<sub>ic</sub> – Necessidades nominais de aquecimento ( $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ )

N<sub>i</sub> – Necessidades nominais de aquecimento máximas ( $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ )

γ – Relação entre os ganhos totais brutos e as perdas térmicas

It – Inércia térmica ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )

η – Factor de utilização dos ganhos térmicos

N<sub>vc</sub> – Necessidades nominais de arrefecimento ( $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ )

N<sub>v</sub> – Necessidades nominais de arrefecimento máximas ( $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ )

FF – Factor de forma

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento e Relevância do Tema

Actualmente em Portugal, o sector doméstico onde se incluem os edifícios de habitação é responsável pelo consumo de aproximadamente 18% de energia primária e de 27% de energia eléctrica. Os edifícios existentes, anteriores às preocupações de conservação de energia nos edifícios (Decreto-lei 40/90 – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE [1]), constituem ainda uma extensa parte do edificado apresentando problemas diversos ao nível da qualidade térmica, que se manifestam em condições sistemáticas de desconforto, em elevadas necessidades de aquecimento/arrefecimento e patologias, como por exemplo, as condensações superficiais.

Os edifícios “Gaioleiros” constituem uma parte importante do edificado de Lisboa e encontram-se extensamente estudados na óptica da sua resistência estrutural, não se conhecendo estudos acerca do seu comportamento térmico, nomeadamente o impacto das suas paredes com espessuras que podem variar entre os 0,2 m e 1,0 m de espessura. Assim, estes edifícios configuram um dos tipos de edifícios existentes onde o seu comportamento térmico se afigura insuficiente face ao actual nível de exigência (RCCTE [2]) e carecem de um estudo mais detalhado.

No presente trabalho prende-se caracterizar experimentalmente o comportamento térmico de um edifício “Gaioleiro” e dessa forma obter valores dos coeficientes de transmissão térmica de paredes e das necessidades térmicas de aquecimento. Com estes resultados pretende-se identificar a adequação dos valores convencionais para o coeficiente de transmissão térmica de paredes e a adaptação das considerações da actual regulamentação térmica a este tipo de edificado. Em função destes resultados, foram identificadas oportunidades de melhoria e avaliou-se o respectivo impacto no desempenho térmico do edifício. Com os resultados obtidos, verifica-se também a adequação do modelo de verificação regulamentar a este tipo de edifícios.

A pertinência deste trabalho experimental surge da insuficiência de estudos que avaliem a transmissão de calor, em climas amenos, de edifícios cuja característica dominante é a elevada espessura das paredes de alvenaria, bem como da necessidade do conhecimento efectivo da resistência térmica das paredes que compõem a envolvente. Face ao escasso trabalho experimental existente neste domínio, neste trabalho, foi necessário desenvolver um modelo para estudar a transmissão de calor em regime dinâmico na parede, bem como implementar correcções específicas para a transmissão de calor por convecção e por radiação nas superfícies.

Com os resultados experimentais pretende-se ter uma caracterização do comportamento térmico do edifício razoavelmente detalhada, para se poder perspectivar de forma fundamentada as medidas de melhoria, no sentido de uma reabilitação térmica e energética sustentável com o objectivo do aumento do conforto térmico de uma parcela importante do edificado existente na cidade de Lisboa e da redução dos eventuais gastos energéticos para climatização.

Este estudo surgiu no âmbito de uma parceria entre o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Fundo de Investimento Fechado Sete Colinas, que tem em vista efectuar a avaliação térmica experimental de um edifício “Gaioleiro” antes da reabilitação e após a reabilitação prevista e que satisfaz ao RCCTE [2]. No âmbito do edifício estudado, existe um outro trabalho acerca dos aspectos da permeabilidade e ventilação.

## 1.2. Objectivos

Com base nos pressupostos anteriormente enunciados, os principais objectivos do presente trabalho de mestrado são:

- 1) caracterizar o comportamento térmico de um edifício “Gaioleiro”, com base no levantamento dimensional e das características construtivas;
- 2) determinar experimentalmente as necessidades de aquecimento de um edifício “Gaioleiro”;
- 3) caracterizar experimentalmente o isolamento térmico de paredes do edifício “Gaioleiro”;
- 4) desenvolver e implementar um modelo de simulação térmica em regime estacionário<sup>1</sup> ISO 13790 [3] e RCCTE [2], e validar o mesmo com os resultados experimentais;
- 5) com base na actividade 4, identificar melhorias necessárias na metodologia de cálculo das necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento em regime estacionário e identificar as diferenças entre os valores calculados e medidos, e
- 6) estimar o potencial de conservação de energia associado à reabilitação de elementos da envolvente com base no método de cálculo de regime estacionário e estimar a respectiva viabilidade técnico-económica.

---

<sup>1</sup> Adoptou-se um modelo de regime estacionário por ser o referencial previsto na regulamentação Portuguesa e por ser um modelo adequado para edifícios continuamente aquecidos por um longo período de tempo. Em trabalho posterior, prevê-se o desenvolvimento e a implementação de um modelo de regime dinâmico.

### 1.3. Metodologia

Tendo em conta os objectivos propostos, no presente trabalho, foi adoptada a seguinte metodologia:

- 1) efectuar pesquisa bibliográfica sobre aspectos de desempenho térmico de edifícios, metodologia experimental e caracterização térmica do edifício objecto de estudo;
- 2) caracterizar experimentalmente o isolamento térmico da envolvente opaca através da medição “*in situ*” das características térmicas das paredes, com base no método do fluxímetro. Foi também utilizado o método médio para determinar a resistência térmica associada às paredes;
- 3) caracterizar experimentalmente as necessidades térmicas de aquecimento através do aquecimento da habitação por efeito de *joule*. Neste ensaio mediram-se os ganhos solares e as condições ambientais;
- 4) análise dos resultados da actividade 2 e determinação da resistência térmica das paredes. Nesta análise de resultados foi necessário desenvolver software específico para determinar a condução de calor nas paredes em regime dinâmico e validar os resultados obtidos;
- 5) análise dos resultados da actividade 3, desenvolvimento e validação do modelo de simulação térmica do edifício com base no modelo de regime estacionário (ISO 13790 [3] e RCCTE [2]). Foi efectuada a determinação do efeito das pontes térmicas por cálculo, utilizando um modelo bidimensional de condução de calor. Foi analisado o efeito da incidência da radiação solar nas paredes e dos ganhos de calor associados à condução em regime dinâmico;
- 6) com o modelo de simulação térmica validado, determinar as necessidades térmicas nominais do edifício e comparar os resultados com o método de cálculo do RCCTE [2] e identificar oportunidades de melhoria do referido método, e
- 7) com os resultados anteriores, identificar oportunidades de melhoria e avaliar o seu impacto em termos de desempenho térmico e de viabilidade económica.

### 1.4. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em oito capítulos principais. O primeiro capítulo diz respeito à apresentação e enquadramento do trabalho, dos objectivos e da metodologia adoptada.

O segundo capítulo diz respeito à revisão bibliográfica, onde se compila informação para caracterizar o edificado “Gaioleiro”, assim como os principais constrangimentos à reabilitação térmica da envolvente deste tipo de edificado. Foram também pesquisadas matérias relativas à eficiência energética em edifícios de habitação, bem como a regulamentação térmica em vigor.

Este capítulo possui ainda uma síntese dos fenómenos de transmissão de calor que normalmente ocorrem nos edifícios, métodos de ensaio utilizados para determinar o comportamento térmico global de um edifício e trabalhos realizados no âmbito de ensaios experimentais com vista à determinação das características térmicas de paredes e a detecção de situações passíveis de causar resultados erróneos na avaliação destas propriedades em campanhas experimentais.

No terceiro capítulo apresenta-se uma descrição do edifício/habitação objecto de estudo, a sua localização e os aspectos mais importantes relativos às características arquitectónicas, estruturais, térmicas e dimensionais encontradas. Definem-se ainda todos os factores e características climáticas especificadas no RCCTE [2] associadas à localização e exposição do edifício.

No quarto capítulo refere-se a avaliação experimental das características térmicas do edifício e necessidades energéticas. Neste capítulo são descritos os métodos utilizados para determinar as características térmicas associadas à habitação estudada. Serão então abordados os métodos do fluxímetro de acordo com a ISO 9869:1994 [4], e do aquecimento, que estiveram na base de todo o trabalho experimental.

O quinto capítulo está associado ao anterior, uma vez que são apresentados os principais resultados experimentais dos ensaios e realizado o tratamento de dados necessários à determinação de parâmetros térmicos fundamentais para o desenvolvimento do trabalho nos capítulos posteriores. Neste capítulo é também apresentado o comportamento dinâmico das paredes, quando sujeitas às condições de ensaio, com o estudo dinâmico da condução de calor no seu interior, sendo verificado o contributo das resistências térmicas superficiais no processo de aquecimento da parede.

No sexto capítulo foi realizado o cálculo das necessidades energéticas de aquecimento da habitação através de um modelo de regime estacionário, partindo dos princípios presentes na ISO 13790 [3] e RCCTE [2] para as condições e período de ensaio. Os resultados foram analisados e comparados com os obtidos no ensaio experimental do método do aquecimento, para posterior validação do modelo térmico da habitação.

No sétimo capítulo é apresentada a apreciação do comportamento térmico da habitação face ao RCCTE [2], onde se procura verificar a influência no cálculo das necessidades energéticas da habitação utilizando os valores de ensaio e os convencionais utilizados no ITE54 [5], nas estações de aquecimento e arrefecimento. São também apresentadas propostas de melhoria ao modelo de cálculo do RCCTE [2], com a introdução do conceito de conforto térmico adaptativo e influência solar nas fachadas na estação de aquecimento. Neste capítulo serão também avaliadas oportunidades de melhoria consideradas para as paredes e vãos envidraçados, onde se apresentam estimativas de poupança energética associadas às diferentes estações. Foi também previsto o custo de investimento que é passível realizar para um período de retorno de 8 anos nas diferentes

soluções, tendo em conta a redução dos consumos energéticos face à situação actual e estimado um período de retorno aproximado, tendo em conta os preços actuais dos materiais.

O oitavo capítulo é referente às conclusões finais onde se procura abordar de uma forma geral as principais questões com maior relevância no presente trabalho e dar ênfase aos resultados obtidos. Foram ainda neste capítulo perspectivados trabalhos futuros, com potencial para serem desenvolvidos no seguimento do presente trabalho e no âmbito do edifício objecto de estudos.



## **2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA**

### **2.1. Edifícios “Gaioleiros”**

O edificado “Gaioleiro” constitui uma tipologia construtiva de grande importância na evolução histórica dos edifícios na cidade de Lisboa, possui ainda nos dias de hoje uma representatividade muito marcada em vários bairros históricos da cidade.

Neste subcapítulo pretende-se identificar de uma forma geral a evolução das tipologias construtivas presentes na cidade de Lisboa e situar temporalmente o edificado “Gaioleiro” assim como o contexto histórico e cultural do seu aparecimento. Serão também abordadas as características ao nível das soluções construtivas e arquitectónicas marcantes deste tipo de edifícios, que permitem distingui-los das demais tipologias construtivas presentes na cidade.

Dada a importância dos edifícios “Gaioleiros”, existe actualmente um plano de reabilitação do edificado antigo onde é sugerido um conjunto de regras e imposições quando se procede a intervenções de reabilitação. Assim sendo, pretende-se dar a conhecer as limitações à actuação dos agentes de reabilitação, uma vez que é objectivo deste trabalho perspectivar medidas que melhorem o isolamento térmico da envolvente.

#### **2.1.1. Evolução dos Edifícios na Cidade de Lisboa**

O património construído sendo ele classificado ou não, com maior ou menor relevância, será sempre identificado como uma referência histórica do ponto de vista técnico, fornecendo elementos importantes para compreender o processo evolutivo das cidades e a forma como se adaptaram ao meio circundante. A cidade de Lisboa alberga no seu território edifícios de diferentes épocas, com tipologias estruturais e construtivas bem marcadas consoante o período de construção.

O património edificado anterior ao século XVIII não possui grande representatividade na cidade, pois ao longo do tempo foi desaparecendo devido a catástrofes de maior ou menor amplitude e até por intervenção do homem através de sucessivas demolições. Os edifícios construídos no século XIX constituem um legado importante para a cidade e têm vindo a assumir um carácter cada vez mais relevante ao longo do tempo, devido não só à localização privilegiada de muitos dos imóveis desta época, mas também com o objectivo de preservar o património histórico que se traduz num esforço de reabilitação no sentido de adaptar estes edifícios às actuais exigências funcionais de habitabilidade e conforto térmico, garantindo ao mesmo tempo a sua segurança estrutural.

A construção foi evoluindo ao longo dos tempos à medida das necessidades de cada época e acompanhando a evolução dos materiais utilizados na construção. Assim sendo, pôde estabelecer-se uma divisão ao nível das tipologias construtivas, de acordo com as suas características estruturais e arquitectónicas relacionadas com a época de construção em que estão inseridas. Os edifícios na cidade de Lisboa podem ser classificados de acordo com a tipologia construtiva e o período histórico em que estão inseridos e dividem-se em [6]:

- I. edifícios com estrutura de alvenaria de pedra (anteriores a 1755);
- II. edifícios com estrutura de alvenaria Pombalinos e Similares (1755 – 1880);
- III. edifícios com estrutura de alvenaria do tipo Gaioleiro (1880 – 1930);
- IV. edifícios com estrutura mista de alvenaria e betão armado (1930 – 1940);
- V. edifícios com estrutura de betão armado preenchido com grande percentagem de alvenaria de tijolo (1940 – 1960), e
- VI. edifícios de betão armado da última fase (1960 - ).

As tipologias construtivas podem ser encontradas em vários pontos da cidade de Lisboa como indicado na Figura 2.1, onde é possível fazer a correspondência entre as tipologias já apresentadas e a legenda da figura.



Figura 2.1 - Localização das tipologias construtivas na cidade de Lisboa [7]

No contexto do presente trabalho, os edifícios que interessam estudar e caracterizar são da tipologia “Gaioleiro”, que representam um período histórico construtivo tendo o seu auge de construção acontecido entre 1880 e 1930. No entanto, pode ser considerado que os primeiros edifícios denominado de “Gaioleiros” possam ter surgido ainda no período referente aos Pombalinos. Uma vez que os “Gaioleiros” são edifícios que apresentam uma construção algo semelhante aos Pombalinos, diferindo na qualidade inferior empregue nos materiais e nos processos construtivos, estima-se que os primeiros “Gaioleiros” tenham surgido sensivelmente a meio do século XIX (1840), como representado na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Evolução das tipologias construtivas - Pombalino e "Gaioleiro"

O parque edificado da cidade de Lisboa é ainda nos dias que correm fortemente representado por edifícios antigos das várias tipologias anteriormente apresentadas, conforme é possível verificar no Quadro 2.1 referente a um estudo realizado em 2001.

Quadro 2.1 - Distribuição dos edifícios de Lisboa pelas principais tipologias construtivas [8]

Tipologia Estrutural	%
Anteriores a 1755, Pombalinos e "Gaioleiros	50
Mista de alvenaria e betão	20
Antigos de betão armado	25
Recentes de betão armado	5

Os valores apresentados no quadro reforçam a ideia de que a representatividade dos edifícios antigos no parque habitacional de Lisboa é de facto bastante considerável (50%), pelo que devem ser adoptadas medidas de conservação numa perspectiva de reabilitação.

### 2.1.2. História do Edifício “Gaioleiro”

O aparecimento dos edifícios do tipo “Gaioleiro” (1880-1930), surge num contexto histórico que teve o seu início no ano de 1755. A data de 1 de Novembro de 1755 ficou marcada por um violento sismo, com dimensões catastróficas para a cidade de Lisboa, que para além do imensurável impacto económico e político na sociedade portuguesa da época, mudou para sempre o processo construtivo na cidade de Lisboa.

Devido ao violento terramoto que se fez sentir (grau 9 na escala de *Ritcher*), deu-se uma subida repentina das águas que banham a zona ribeirinha da cidade com ondas que se crêem ter chegado a uma altura de 20 metros, posteriormente, deflagraram múltiplos incêndios que duraram cerca de seis dias completando assim o cenário de destruição de toda a baixa de Lisboa destruindo milhares de habitações. Estima-se que o número de vítimas se estendeu até 35% da população num universo de 250.000 habitantes e que a percentagem de edifícios destruídos ou com danos estruturais considerados graves, chegou aos 10% e 60% respectivamente [9].



Figura 2.3 - Vista de Lisboa antes do terramoto (superior) e depois do terramoto (inferior) [10]

A partir deste momento dá-se o ponto de viragem na construção de edifícios de habitação na cidade de Lisboa, o abalo que se fez sentir expôs de forma inequívoca as fragilidades estruturais dos edifícios que se construía até à data.

Face à destruição sentida na baixa Lisboa era necessário proceder à sua reconstrução, nesse sentido a 4 de Dezembro de 1755, Manuel da Maia engenheiro mor do reino, apresenta a primeira parte de um tratado onde propõe várias alternativas possíveis para a reconstrução da cidade. Foram formadas três equipas de arquitectos e engenheiros militares chefiadas pelos capitães Elias Poppe, Eugénio dos Santos e pelo ajudante Gualter da Fonseca, a estas equipas foi solicitada a execução de projectos que tivessem como pressupostos o melhoramento da segurança dos edifícios e a higiene das ruas e das habitações. Foi então aceite o projecto de reabilitação da baixa da autoria dos arquitectos Eugénio dos Santos e Carlos Mardel datado de 12 de Junho de 1758, cuja disposição final é apresentada na Figura 2.4.



Figura 2.4 - Projecto de reconstrução da baixa de Lisboa [10]

Do contributo dos engenheiros e arquitectos resulta a criação de um sistema capaz de dotar os edifícios de condições de sustentação às acções de um sismo, surge então neste período a denominada “*Gaiola Pombalina*”, uma estrutura de madeira que procurava assegurar a estabilidade da estrutura central das habitações da época [11].

A gaiola de madeira tinha então como principal função assegurar aos edifícios capacidade resistente às acções horizontais, conferindo-lhes uma estrutura de madeira preenchida com

alvenaria de pedra. A descrição estrutural destes edifícios feita por França (1983) [12], vai no sentido de que “A descrição técnica de gaiola é assaz simples: compõem-se essencialmente de um jogo de prumos e travessanhos, cujas secções são, respectivamente, de 15 por 13 centímetros e de 10 por 13 centímetros. Os travessanhos são ligados às paredes por ‘mãos’. A parte superior dos prumos é ligada pelos frechais. A madeira empregada é o carvalho ou o azinho. As ligações entre estes elementos são asseguradas por um sistema macho-fêmea (...)”.

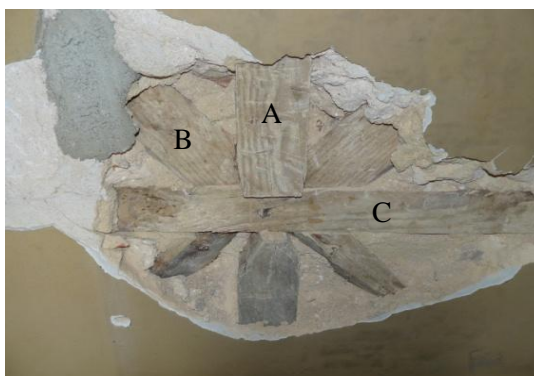


Figura 2.5 - Gaiola Pombalina

**Legenda:**

A – Prumos

B – Escoras

C – Travessanhos

No período pós-sismo surge a denominada “*Época Pombalina*”, caracterizada essencialmente pela excepcional qualidade da construção, devido à memória recente do sismo aliadas às novas directivas Pombalinas. Nesta altura foi reconstruída integralmente a zona baixa de Lisboa, estendendo-se a construção a novas áreas urbanas situadas a Noroeste da cidade [13]. O plano pombalino é caracterizado por coerência, homogeneidade e equilíbrio assentes numa “estrutura reticulada do traçado dos eixos viários, na proporção e no posicionamento relativo dos quarteirões, e na uniformidade dos edifícios projectados em termos de alçados e de compartimentação interior” [6].

Os anos foram passando sobre a data do terramoto, fazendo esquecer as consequências que dele resultaram associadas às debilidades estruturais dos edifícios, abrindo desta forma o caminho para um abrandamento sucessivo das exigências pombalinas e para o aparecimento de um novo tipo de construção na cidade de Lisboa, que se proliferou entre meados do século XIX e o princípio do segundo quartel do século XX. A nova forma de construir conserva algumas das características do período Pombalino, sendo considerada uma construção de pior qualidade em que se perdeu ou ignorou o rigor construtivo antes adoptado, ao passar de “*Gaiola Pombalina*” para “*Gaioleiro*”.

No final da década de 1870 começam então a surgir em grande escala os edifícios denominados de “*Edifícios Gaioleiros*” numa fase de grande expansão urbana na cidade de Lisboa, existindo uma predominante concentração destes edifícios, expandindo as fronteiras da cidade a Norte e a Poente. O edificado “*Gaioleiro*” começa a surgir em grande número numa época onde se registou um aumento significativo da população na cidade de Lisboa (Figura 2.6), era portanto necessário encontrar alternativas para responder às necessidades, havendo por isso urgência em edificar de

uma forma mais célere os edifícios e o mesmo prédio deveria concentrar mais pessoas de modo a responder às exigências demográficas e sociais da época, resultando num período de pura especulação imobiliária.

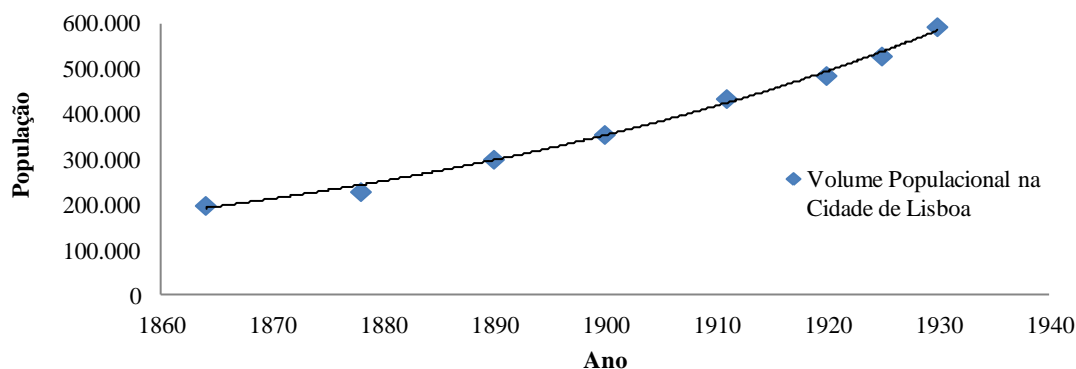


Figura 2.6 - Volume populacional na cidade de Lisboa (1864 - 1930) [14]

De uma forma geral, “a construção deste tipo de edificado está directamente ligado ao prédio de rendimento Lisboaeta, segundo duas modalidades – o prédio construído para vender, ou construído por encomenda mas destinado a ser alugado por fracções” [11]. O número de pisos aumentou para 5 e 6 pisos, utilizando-se cada vez menos a gaiola de madeira característica dos edifícios Pombalinos ou alterando a sua concepção original, chegando mesmo a desaparecer elementos de solidarização horizontal em paredes-mestras [15]. Os materiais utilizados na construção eram na generalidade de menor qualidade, quando comparados com os da época antecessora e a construção dos diversos elementos mais descuidada.

O edificado “Gaioleiro” perdurou durante cerca de 60 anos até 1930, tendo o seu declínio início no ano em que começaram a surgir os edifícios “de placa” (edifícios mistos de alvenaria e betão armado). Actualmente, os edifícios “Gaioleiros” padecem de muitos problemas devido ao estado avançado de degradação e por ao longo do tempo de uma forma geral, não serem considerados merecedores de medidas de protecção por partes das entidades do património arquitectónico, que o justificam pela falta de qualidade que apresentam, sendo frequente encontrar este tipo de edificado associado a graves problemas de segurança estrutural, pondo muitas vezes em causa a segurança da via pública.

### 2.1.3. Caracterização do Edificado “Gaioleiro”

O edificado “Gaioleiro” é apresentado na história como o retrato físico do declínio da qualidade de construção exigida e praticada no período pombalino, com a decadência da gaiola pombalina, a aplicação de materiais de menor qualidade e a simplificação dos processos construtivos comparativamente ao anterior período, caracterizando assim os edifícios de transição entre os séculos XIX e XX.

Este tipo de edifícios possuem então uma maior liberdade formal do que no período pombalino, verificado pelas diferentes secções de cantaria e na utilização de janelas constituídas por madeiras resinosas, cerne de pinho ou casquinha com formas variadas. É por isso habitual, encontrar-se na fachada principal de um edifício janelas de sacada e de peitoril no mesmo piso, promovendo o aumento das suas dimensões e conseqüentemente o aumento dos vãos. A composição das fachadas é definida através de três zonas bem marcadas, soco, zona intermédia e sistema de platibanda/telhado.

A organização funcional é também diferente comparativamente a outros períodos, com a introdução de varandas ou “marquises” metálicas na fachada posterior ao qual aparece associada uma escada de serviço igualmente metálica. As casas de banho situam-se normalmente associadas à fachada de tardez ou confinantes aos saguões e as fracções possuem um longo corredor longitudinal que percorre todas as divisões da casa. Os saguões cujo objectivo passa por introduzir ar e luz no interior dos edifícios, são também elementos presentes neste tipo de edificado.

De acordo com Appleton (1996) [16], as soluções construtivas dos edifícios “Gaioleiros” podem ser caracterizadas da seguinte forma:

- paredes exteriores de fachada e tardez constituídas por alvenaria ordinária de pedra irregular argamassada (variando de pedra rija até a calcários brandos), podendo ser de tijolo maciço nas empenas e saguões de espessura variável ao longo do desenvolvimento da fachada em altura. No piso do rés-do-chão a espessura pode chegar aos 0,90 m diminuindo gradualmente, podendo chegar aos 0,50 m no último piso;
- paredes interiores fundamentalmente de dois tipos: paredes de frontal, constituídas por alvenaria de tijolo precariamente “confinada” por uma malha ortogonal de montantes no contorno de portas e vãos, travessas ao nível dos pavimentos e a uma cota intermédia; as paredes de tabique ou “tabiques” são constituídas essencialmente por pranchas de madeira ao alto, fasquiadas e rebocadas, estes elementos apresentam um carácter muito deformável e a sua resistência a esforços de compressão, de corte e flexão é escassa;
- pavimentos de madeira, frequentemente de pinho marítimo ou casquinha, orientados perpendicularmente às fachadas sendo utilizados vigamentos de peças únicas em toda a profundidade do edifício. Os vigamentos apoiam directamente nas paredes de alvenaria, frequentemente sem recurso a frechais ou simplesmente pregados a estes elementos, apresentando debilidades ao nível da rigidez e resistência podendo levar a abaulamentos do pavimento;

- coberturas com estruturas de madeira que se adaptam às utilizações dos sótãos, cuja compartimentação não respeita a continuidade da estrutura subjacente, e
- revestimentos exteriores de reboco nas zonas correntes tendo sido verificada a tendência para o abandono do soco de pedra e substituído por fingimentos de argamassa. Em alguns casos foram adoptados revestimentos originais de azulejo que normalmente preenchiam a totalidade da fachada principal. Os revestimentos interiores de paredes e tectos utilizam o estuque.

Os pontos enunciados constituem as principais características associadas aos “Gaioleiros” que os tornam tão singulares e que normalmente são usadas para os identificar e distinguir das restantes tipologias construtivas. Em seguida apresenta-se na Figura 2.7, um corte de um edifício tipo “Gaioleiro” e os principais elementos caracterizadores.

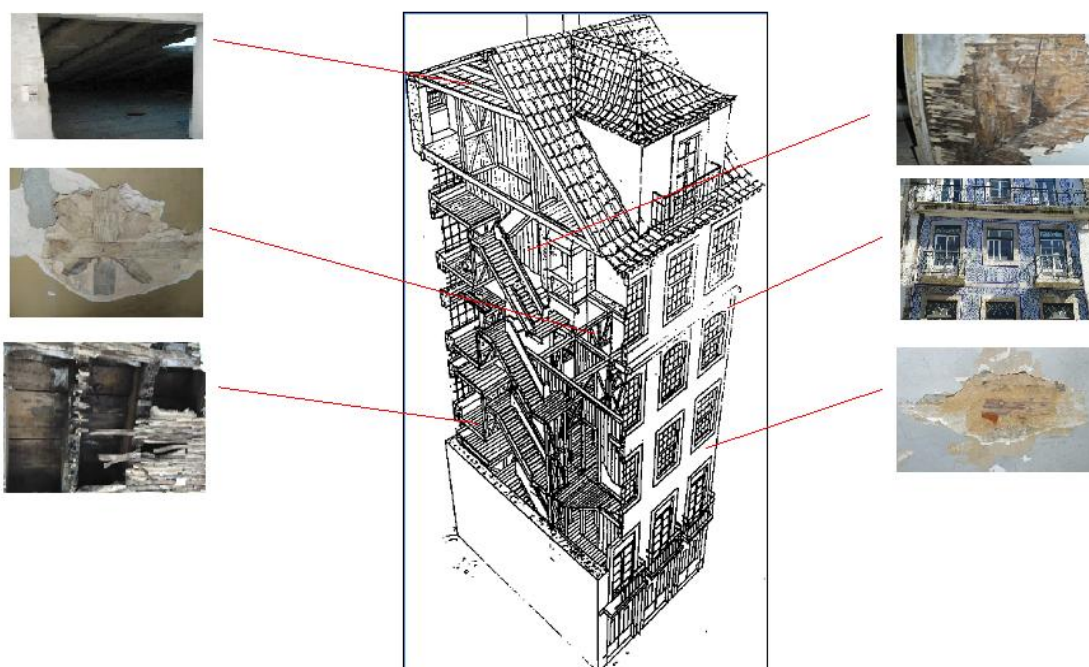


Figura 2.7 – Corte de edifício tipo “Gaioleiro” [7] e elementos caracterizadores

#### 2.1.4. Constrangimentos à Reabilitação das Fachadas de Edifícios Históricos

Quando se perspectivam intervenções quer seja ao nível de reabilitação, ampliação ou de alteração de edifícios que detêm um carácter histórico, seja pela época de construção ou pelo local onde estão inseridos, há que considerar um conjunto de barreiras e constrangimentos legais impostos pelas diversas entidades, nomeadamente câmaras municipais e/ou entidades de gestão do património histórico. No caso concreto da cidade de Lisboa, reconhecida pela sua riqueza histórica, destacam-se no âmbito dos edifícios antigos, os referentes ao período pombalino e pós-pombalino que marcam um período histórico após o terramoto de 1755. A maior concentração deste tipo de edificado situa-se na denominada baixa Pombalina ou simplesmente “Baixa”,

engloba um conjunto de edifícios cujas características arquitectónicas detêm um importante interesse histórico e cultural para a cidade.

No Plano Director Municipal da cidade de Lisboa (PDM) [17], existem várias indicações com o objectivo da preservação do património histórico da cidade. De acordo com este documento, nas áreas históricas habitacionais, de uma forma geral, são permitidas obras de alteração dos edifícios desde que sejam efectuadas simultaneamente obras de beneficiação e/ou restauro, com a conservação dos elementos arquitectónicos e construtivos considerados de valor cultural ou que constituam um contributo para a caracterização do conjunto em que se inserem. No âmbito desta temática e no sentido de criar regulamentação com orientações específicas acerca dos limites efectivos ao nível de reabilitação de um edifício histórico, foi elaborado um “Plano de Pormenor de Salvaguarda da Baixa Pombalina” (PP) [18]. O objectivo do PP passa por assegurar a manutenção das principais características arquitectónicas dos edifícios, definindo um conjunto de orientações que devem ser respeitadas com vista à não alteração das condições arquitectónicas iniciais, nomeadamente no que diz respeito ao seu aspecto exterior. No referido regulamento estão contempladas uma série de imposições à alteração de componentes como fachadas; coberturas; sistema estrutural; interiores; saguões e logradouros. No contexto do presente trabalho, interessa apenas definir o que é imposto para a envolvente exterior, nomeadamente para fachadas. Nesse sentido, o PP no seu Artigo 21º dispõe de um conjunto de orientações gerais para a reabilitação de fachadas, a referir:

- I. são autorizadas obras de conservação e beneficiação de fachadas, com valorização dos elementos de revestimento originais, bem como daqueles que, não sendo originais, constituem elementos com reconhecido valor histórico e artístico;
- II. obras de conservação e beneficiação de fachadas, incluem o restauro de elementos degradados e reposição de elementos alterados ou destruídos;
- III. são autorizadas obras de alteração de fachadas que tenham o propósito de:
  - melhorar o desempenho estrutural do edifício, e/ou repor métricas, ritmos, materiais e características originais dos edifícios;
  - reforçar a estrutura do imóvel através da introdução de elementos resistentes nos seus paramentos interiores para, entre outros, garantir a segurança sísmica do edifício, e
  - remover revestimentos desadequados e sem valor cultural, bem como elementos dissonantes.

As directrizes definidas anteriormente definem os critérios de intervenção nas fachadas dos edifícios, caso se conceda autorização para o efeito são definidas regras claras no anexo 3 do PP para o tratamento dos elementos que constituem as fachadas. No que diz respeito à substituição dos vãos envidraçados e portas exteriores o plano estabelece que:

- portas e janelas que apresentem características tradicionais<sup>2</sup> apenas podem ser substituídas por outras de idêntica forma e cor;
- portas e janelas, sem características tradicionais e sem reconhecida qualidade formal, podem ser substituídas por outras que se integrem no edifício e na envolvente, com respeito pelas métricas, formas e cores dominantes, e
- não é permitida a aplicação de vidro reflector ou pigmentado em portas e janelas.

As cantarias tradicionais de enquadramento dos vãos e as cantarias das varandas e respectivas consolas, apenas podem ser substituídas por outras de igual material, forma e acabamento, em casos em que os elementos existentes apresentem um nível de deterioração grave com impossibilidade de restauro, não sendo também autorizados o seu capeamento. A aplicação de estores e persianas exteriores nos vãos envidraçados, carece de aprovação municipal.

A remoção de elementos decorativos exteriores dos edifícios, designadamente cunhais, frisos, cornijas, platibandas, socos, molduras e os acessórios decorativos existentes e de revestimento exterior caracterizadores do edifício, como cantarias, azulejos e mosaicos, só é permitida nos casos em que os elementos sejam dissonantes ou então que a sua conservação e restauro seja comprovadamente impraticável, devendo a sua substituição respeitar as características iniciais, nomeadamente os materiais, a pormenorização e a cor. No que diz respeito aos revestimentos exteriores a aplicar numa fachada, existem também considerações que visam a manutenção das condições naturais do edifício e que vão no sentido de garantir que a substituição de rebocos em fachadas deve ser realizada de forma a recuperar a aparência original do edifício.

Em síntese, qualquer medida de reabilitação que vise a alteração do aspecto exterior das fachadas é totalmente proibida, o que de certa forma impossibilita a utilização de sistemas de isolamento térmico como, por exemplo, os revestimentos independentes com interposição de isolante térmico no espaço de ar ou sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior (ETICS). As intervenções a realizar ficam desta forma limitadas a uma intervenção pelo interior, com colocação de isolamento térmico nas superfícies interiores das paredes da envolvente. Não é igualmente permitida a aplicação pelo exterior de dispositivos de protecção solar ou de oclusão. Em relação às janelas, as mesmas podem ser alteradas desde que se mantenham as características iniciais, sendo fundamental a conservação da forma e cor da janela bem como dos materiais que as constituem.

---

<sup>2</sup> Elementos com reconhecido valor arquitectónico, representativos da época de construção do edifício.

## 2.2. Eficiência Energética em Edifícios de Habitação

A eficiência energética nos edifícios de habitação é um conceito bastante abrangente, e que neste trabalho se cinge à energia para aquecimento, arrefecimento e ventilação. Neste contexto um edifício mais eficiente pode referir-se à melhoria do nível de conforto térmico que se pode alcançar face a um determinado consumo energético, ou na redução da energia despendida para assegurar um mesmo nível de conforto térmico.

Ao longo das últimas décadas têm-se vindo a intensificar as preocupações relacionadas com o consumo de energia fóssil dos vários sectores ligados à economia mundial, que resultam na emissão de gases com efeito de estufa (GEE) para a atmosfera terrestre e aos quais se considera estarem associados fenómenos de alterações climáticas. Em Portugal, cedo se percebeu a importância da redução dos consumos de energia associados aos edifícios. De acordo com uma publicação do Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (INETI) [19] referente ao ano de 1997, foram construídos desde o princípio da década de 80, edifícios designados como *Edifícios Solares Passivos*, com base nos princípios de uma arquitectura solar passiva, que na sua concepção, aborda o clima como uma variável importante no processo de concepção e projecto, revelando o papel fundamental da interacção do sol com o edifício no seu desempenho térmico.

No princípio da década de 90 surge a regulamentação térmica em Portugal aplicada aos edifícios de habitação e serviços, quando já grande parte da Europa Comunitária detinha os seus próprios regulamentos sobre esta matéria. Aproveitando a experiência adquirida nos outros países e atendendo à especificidade do clima português, foi publicado o primeiro regulamento em 1990, através da aprovação do Decreto-Lei n.º 40/90 de 6 de Fevereiro [1], designado por Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), que entrou em vigor em 1991. Este regulamento teve como carácter inovador os aspectos ligados ao conforto térmico no Verão, tendo sido o primeiro regulamento europeu a impor requisitos de protecção solar nos vãos envidraçados, para além da redução das necessidades de aquecimento e arrefecimento nos novos edifícios limitando potenciais consumos [20]. O regulamento veio estabelecer limites mínimos para a qualidade térmica dos edifícios em Portugal, quer ao nível dos coeficientes de transmissão térmica dos elementos opacos da envolvente, quer das protecções solares dos vãos envidraçados no período de arrefecimento, contribuindo também para a crescente utilização de isolamentos térmicos nos edifícios novos bem como a utilização de vidros duplos, melhorando a qualidade da sua envolvente. Mais tarde, surge o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) aprovado pelo Decreto-Lei n.º 118/98, de 7 de Maio [21]<sup>3</sup>. O RSECE tinha como principais objectivos fixar limites de potência máxima dos sistemas de climatização a instalar nos edifícios, para que a tendência que existia no mercado de sobredimensionamento

---

<sup>3</sup> Entretanto foi publicado o RQSECE (Decreto-Lei n.º 156/92, de 29 de Julho), que não entrou em vigor.

fosse regularizada de modo a contribuir para a eficiência energética. Este regulamento exigia a adopção de medidas de racionalização energética em função da dimensão dos sistemas e considerava a necessidade da prática de procedimentos de recepção após a instalação dos sistemas e respectiva manutenção [22].

As medidas tomadas individualmente por cada país não foram suficientes para reduzir os consumos de energia, e como tal, os níveis de gases com efeito de estufa enviados para a atmosfera continuavam a crescer. Com a crescente preocupação a nível mundial acerca dos níveis de emissões de GEE para a atmosfera, em 1997 foi assinado o protocolo de Quioto com o objectivo de impor limites e perspectivar reduções nas emissões a médio-longo prazo. Este acordo contou com a participação de 156 países e fixou objectivos no que diz respeito à redução de GEE para a atmosfera, vinculando os participantes, nomeadamente os países desenvolvidos e industrializados, a cumprirem metas de redução das emissões em média de 5%. A União Europeia aderiu em 1998 ao protocolo, estabelecendo a todos os países que a constituíam antes de 2004 uma meta de redução de 8% das suas emissões entre 2008 e 2012, tendo por base o nível de emissões registado em 1990.

Com o compromisso assumido pela União Europeia quanto à redução do consumo energético consumado com a assinatura do protocolo de Quioto (1997), era importante melhorar a eficiência energética do sector dos edifícios e reduzir o consumo de energia. Assim sendo, a União Europeia publicou em 4 de Janeiro de 2003, a Directiva Comunitária n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002, relativa aos desempenhos energéticos nos edifícios novos e em grandes reabilitações. Segundo Isolani, 2008 [23], a directiva comunitária impõe aos países membros a emissão de certificados energéticos para edifícios, assentes em quatro pilares fundamentais:

- métodos de cálculo comuns do desempenho energético integrado dos edifícios;
- definição dos padrões mínimos de desempenho energético em edifícios novos e existentes que estejam a ser objecto de renovações profundas;
- certificação energética de edifícios novos e existentes e afixação nos edifícios públicos de certificados de desempenho energético, e
- inspecção regular de caldeiras e sistemas de ar condicionado nos edifícios e avaliação da eficiência energética dos sistemas de aquecimento central com caldeiras que tenham mais de 15 anos.

Na perspectiva de inverter a tendência dos últimos anos do século XX e primeiros anos do século XXI do aumento do consumo energético no sector dos edifícios e para promover um maior enquadramento entre a Directiva Comunitária e os regulamentos em vigor em Portugal, no ano de 2006 houve a necessidade de reformular os dois únicos regulamentos que tratavam da questão

energética no sector dos edifícios em Portugal, surgindo o Decreto-Lei nº. 80/2006 (RCCTE) [2] e o Decreto-Lei 79/2006 (RSECE) de 4 de Abril [22].

O RCCTE [2] foi então revisto de modo a proporcionar condições de eficiência energética nos edifícios novos e nas grandes reabilitações e visam fundamentalmente o [23]:

- I. aumento das exigências de conforto térmico, seja ele de aquecimento ou arrefecimento, e de ventilação para garantia de qualidade do ar interior dos edifícios, bem como garantir que as necessidades de água quente sanitária possam vir a ser satisfeitas sem dispêndio excessivo de energia, e
- II. sejam minimizadas as situações patológicas nos elementos de construção provocadas pela ocorrência de condensações superficiais ou internas, com potencial impacto negativo na durabilidade dos elementos de construção e na qualidade do ar interior.

Em simultâneo com a revisão do RCCTE e RSECE, surge o Decreto-Lei nº. 78/2006 de 4 de Abril conhecido como Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) que de certa forma vai ao encontro do pretendido pela União Europeia pela Directiva Comunitária lançada no ano de 2003. Nesse sentido o SCE veio assegurar a aplicação regulamentar, no que respeita às questões de eficiência energética de acordo com as exigências e disposições contidas no RCCTE e RSECE. A referida norma tem como propósito a certificação do desempenho energético e a qualidade do ar nos edifícios, e contempla ainda medidas correctivas ou de melhoria de desempenho energético e qualidade do ar interior aplicáveis aos edifícios e respectivos sistemas energéticos, nomeadamente em caldeiras e equipamentos de ar condicionado [24].

As novas metas traçadas pela União Europeia, alcançadas no Conselho Europeu de 8 e 9 de Março de 2007, tem por objectivo proceder a uma redução de 20% dos níveis de emissões de GEE, 20% no consumo de energia face aos níveis de 1990 e o aumento da proporção de energias renováveis também em 20% até 2020. A aplicação destas medidas visa a melhoria dos níveis de eficiência energética, incidindo com especial atenção na gestão dos edifícios públicos, residenciais e de serviços através de um sistema nacional de certificação energética e da qualidade do ar interior nos edifícios [25]. A urgência destas medidas na Europa deve-se em especial à quantidade de energia consumida nos edifícios que em média na União Europeia representa 40% do consumo energético total [26]. De acordo com dados da União Europeia, se nada for feito, a dependência em relação às importações de energia será um desafio crescente chegando mesmo a atingir um nível que se considera insustentável (Figura 2.8).

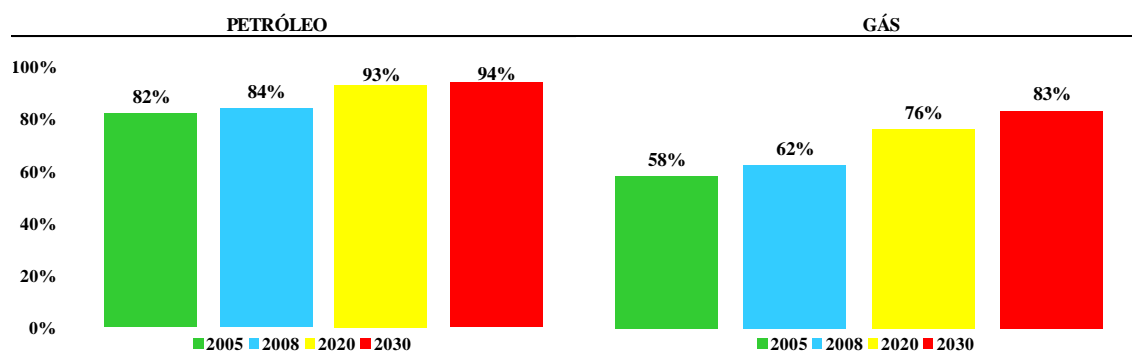


Figura 2.8 - Evolução da dependência Europeia na importação de energia primária [27]

A energia que efectivamente se consome no dia-a-dia, sob a forma de calor, iluminação e força motriz, designa-se por energia útil. Esta energia resulta da conversão de formas de energia realizadas por determinados sistemas ou equipamentos, que tomam a designação de energia final expressa em kWh. Por outro lado, estas formas de energia advêm da transformação de recursos energéticos aos quais se chamam de energia primária.

Actualmente Portugal produz apenas 15% da energia que consome, tornando-se num dos países que mais depende do exterior, no que diz respeito à energia primária. Esta situação tem consequências directas numa economia ainda muito dependente da energia importada, uma vez que o custo dos combustíveis fósseis tem hoje uma relação directa com os serviços que dele dependem, encarecendo a produção de bens e serviços no território nacional. Em 2005, por cada 100 euros de importações, 38 euros foram dispendidos na compra de petróleo e derivados [28]. De acordo com os balanços energéticos publicados pela Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG), é possível verificar a evolução ao longo dos anos do peso dos diferentes sectores que influenciam directamente o consumo energético em Portugal. Os dados recolhidos mostram a evolução desde o ano de 2000 até 2008 (Figura 2.9), dos sectores responsáveis pela maior parte da energia primária consumida.

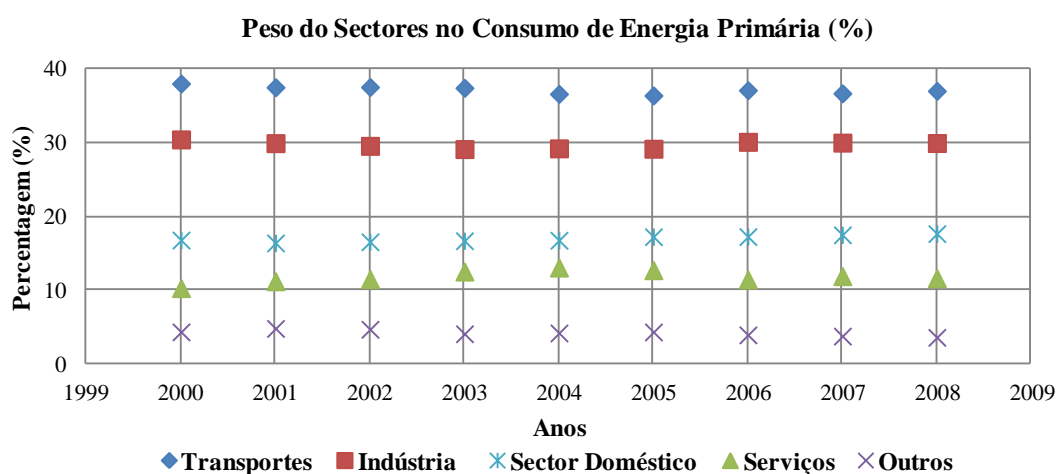


Figura 2.9 - Gráfico do consumo de energia primária (Fonte: DGEG)

Neste momento o sector residencial conta com aproximadamente 3,3 milhões de edifícios, sendo um dos sectores com maior influência no crescimento económico do país que de acordo com os dados de 2008, é responsável por 17,7% dos consumos globais de energia primária. No que diz respeito à energia eléctrica, entre os anos de 2000 e 2008, o consumo anual médio *per capita* aumentou em média 3,4%, traduzindo-se num aumento global do consumo em aproximadamente 12,4 mil milhões de kWh. Como é possível verificar pela Figura 2.10, o sector mais importante do consumo de electricidade é o industrial (cerca de 37,5%), ainda assim, o consumo doméstico e não doméstico representava em 2008 uma fatia importante do consumo total de electricidade com cerca de 27,3% e 23,2% respectivamente, concentrando 50,5% do total do consumo, dados que devem ser vistos com alguma preocupação acentuando a necessidade de dar especial atenção à eficiência energética nos edifícios de habitação e serviços.

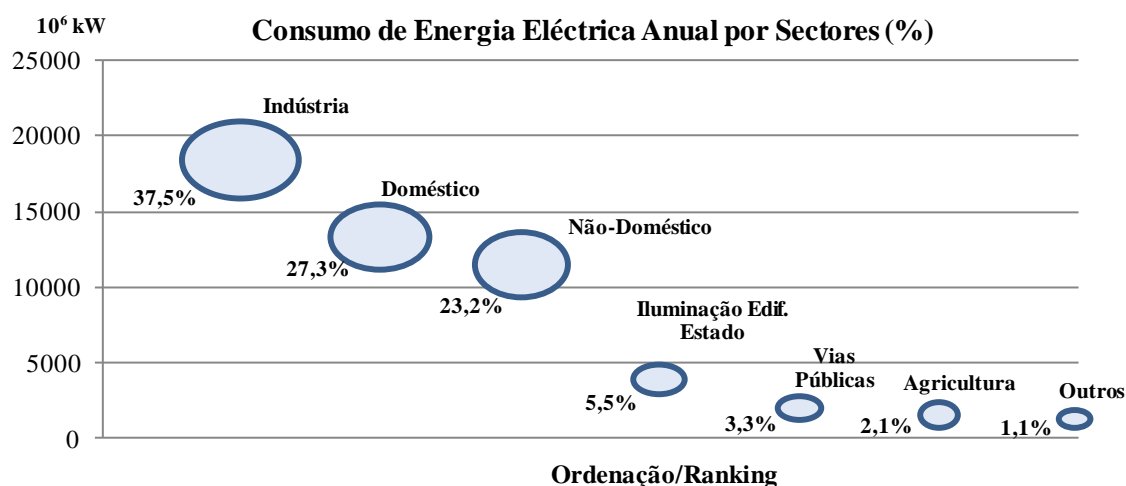


Figura 2.10 - Gráfico do consumo de energia eléctrica (Fonte: INE, 2008)

Os edifícios residenciais são utilizados por mais de 10 milhões de pessoas, existindo alguma inércia no que diz respeito à adopção de padrões eficientes de consumo de energia. Em termos de utilizações finais, os consumos de energia nos edifícios residenciais distribuem-se aproximadamente da seguinte forma: cozinhas e águas quentes sanitárias 50%, aquecimento e arrefecimento 25%, iluminação e equipamentos electrodomésticos 25% [29].

Em 2008 foi elaborado um Plano Nacional para a Eficiência Energética (PNAEE), este documento é um dos mais importantes a nível nacional na condução da actual política energética portuguesa. O plano ambiciona uma poupança anual de energia de 1% até ao ano de 2016, tomando como base a média de consumos de energia final, registados no quinquénio 2001-2005 (aproximadamente 18347 tep) [30]. O PNAEE abrange quatro áreas específicas, transportes, residencial e serviços, indústria e estado, actuando ao nível dos comportamentos, fiscalidade, incentivos e financiamento. Ao nível da área residencial e serviços, o plano integra três grandes programas de eficiência energética:

- *programa renove casa*, onde são referidas medidas de eficiência energética na iluminação, electrodomésticos, electrónica de consumo e reabilitação de espaços;
- *sistemas de eficiência energética nos edifícios*, que agrupa medidas que resultam do processo de certificação energética nos edifícios, num programa que inclui diversas medidas de eficiência energética nos edifícios, melhoria de vãos envidraçados e sistemas energéticos, e
- *programa renováveis na hora*, que é orientado para o aumento da introdução de energias endógenas nos sectores residencial e serviços.

Segundo os dados da ADENE de Maio de 2010 relativos ao Sistema de Certificação Energética sobre os edifícios com certificado energético em Portugal, 64% estão abaixo do limiar aplicável a novos edifícios; 80% não verifica  $N_{ic} \leq N_i$ ; 4% não verifica  $N_{vc} \leq N_v$ , e 46% não verifica  $N_{ac} \leq N_a$ , sendo urgente a criação de um plano de incentivos fiscais à introdução de medidas de melhoria do consumo energético [31].

Mais recentemente, a revisão da directiva 2002/91/CE de 16 de Dezembro dá origem à directiva 2010/31/EU de 19 de Maio de 2010. Com ela surge um novo fôlego ao desafio da eficiência energética colocando grandes desafios aos Estados Membros, estabelecendo que a aplicação da directiva teria de ser alargada a um parque edificado mais abrangente e que todos os edifícios novos ou alvo de grandes reabilitações terão de ser “Near Zero Energy Building” a partir de 2020. A directiva sugere ainda na perspectiva de edifícios com desempenho energético muito elevado, a instalação de aquecimentos para fornecimento de AQS e ventilação, e de sistemas solares passivos. Nestes edifícios, as pequenas necessidades energéticas associadas à sua utilização deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, levando assim ao aparecimento de edifícios de grande eficiência energética [31].

Actualmente, ao nível legislativo em Portugal continuam em vigor os Decretos-Lei nº. 78/2006 [24], nº. 79/2006 [22] e nº. 80/2006 [2]. A aplicação dos dois últimos pode ser sintetizada no âmbito do sector da habitação de acordo com o quadro seguinte [25]:

Quadro 2.2 - Aplicação dos regulamentos térmicos a edifícios de habitação [25]

<b>Aplicação dos Regulamentos Térmicos dos Edifícios</b>		
Habitação	Sujeitos a Licenciamento Municipal e a Processo de Certificação Energética	
Novos edifícios e grandes reabilitações	Regulamentos Aplicáveis	Requisitos
Sem sistemas de climatização ou potência de climatização * $\leq 25$ kW	RCCTE	Energéticos
		Qualidade da Envolvente
		Obrigatoriedade de Colectores Solares **
Com sistemas de climatização ou potência de climatização * $> 25$ kW	RCCTE + RSECE	Energéticos
		Qualidade do Ar

\* Potência nominal de aquecimento ou arrefecimento

\*\* Sempre que exista consumo de água quente sanitária e exposição solar adequada

A obrigatoriedade de aplicação regulamentar tem início a 3 de Julho de 2006 e a certificação energética tornou-se obrigatória para grandes edifícios (área superior a 1000 m<sup>2</sup>) cuja construção tenha sido licenciada em data posterior a Julho de 2007. A 1 de Julho de 2008 a certificação passou a ter carácter obrigatório também para os edifícios novos mais pequenos com construção aprovada a partir dessa data. A partir de 1 de Janeiro de 2009, a certificação energética passou a ser obrigatória para os edifícios já existentes que sejam vendidos ou arrendados a partir dessa data.

### 2.2.1. Aspectos Condicionantes do Desempenho Energético dos Edifícios

A eficiência energética de um edifício é condicionada por múltiplos factores associados às soluções construtivas adoptadas, assim como às condições ambientais da envolvente. Desta forma, existem um conjunto de variáveis que devem ser conjugadas no sentido de promover condições de redução do consumo de energia nas estações de aquecimento e de arrefecimento que serão abordados na presente secção.

A tomada de opções ao nível do projecto de construção e/ou reabilitação de um edifício, deverá seguir as linhas orientadoras da regulamentação em vigor, contudo, terá também de ter em consideração aspectos que elevam o desempenho energético do edifício. Nessa perspectiva, a eficiência energética nos edifícios de habitação começa na fase de projecto no qual se deve otimizar o seu balanço energético no Inverno ( $N_{ic}$ ) e no Verão ( $N_{vc}$ ).

#### a) Forma e Clima

As necessidades energéticas de aquecimento de uma habitação prendem-se de uma forma geral com o facto do calor gerado no seu interior ser continuamente transmitido para o exterior através das suas superfícies externas. Daqui resulta que um dos factores que mais contribui para promover as transferências de calor de uma habitação é o factor de forma (FF), que resulta do quociente entre o somatório das áreas da envolvente em contacto com o exterior e interior e o volume, e portanto, quanto maior for o seu valor, maiores serão as trocas de calor associados à habitação. Nesta perspectiva deve procurar-se formas simples e que reduzam o factor de forma.

A localização geográfica e o clima têm uma influência decisiva no comportamento térmico dos edifícios. De acordo com o RCCTE [2], numa zona classificada como I3 (clima mais severo) poderemos ter 2860 GD de aquecimento, enquanto numa zona I1 (corresponde a locais amenos) teremos cerca de 940 GD de aquecimento, assim o clima pode reportar-se a um factor de 3,0 nas necessidades de aquecimento. Na estação de aquecimento, com base nas temperaturas médias de arrefecimento poderemos ter um factor de 1,3 entre a zona V3 e V1. Assim, uma das preocupações do sector da construção deve ser projectar e conceber edifícios com o clima,

atendendo aos valores médios das estações, bem como aos valores extremos. A radiação solar disponível no país é relativamente constante.

Os edifícios devem ser então adaptados às características da localização onde se inserem, possibilitando assim adaptar soluções construtivas que visem limitar as transferências de calor.

b) Isolamento Térmico da Envolvente

As necessidades energéticas de um edifício estão intimamente relacionadas com a qualidade dos elementos que compõem a sua envolvente. As insuficiências que sistematicamente acontecem no dimensionamento e/ou aplicação dos isolamentos térmicos, têm repercussões a médio prazo nas condições higro-térmicas interiores ou consumo energético. Por definição, a envolvente de um edifício é a barreira física entre o interior e o exterior, representado pelas paredes, vãos envidraçados, portas, pavimentos e coberturas pelo que devem conter um conjunto de características e elementos que limitem as trocas de calor do interior para o exterior.

Como principal factor ligado às perdas de calor pela envolvente, destaca-se o nível de isolamento térmico dos elementos opacos da envolvente, os quais nos edifícios mais antigos é normalmente insuficiente.

Associado ainda à envolvente opaca, deve também ser destacado o contributo das pontes térmicas planas e lineares, que de uma forma geral podem ser definidas como zonas na envolvente onde existe uma concentração do fluxo de calor em relação às restantes superfícies correntes dos elementos da envolvente. As pontes térmicas são provocadas por descontinuidades existentes no isolamento térmico, resultado da deficiente aplicação do mesmo e também por elementos cujos coeficientes de transmissão térmica são superiores aos das paredes onde estão inseridos como é o caso das vigas, pilares e caixas de estores. Para além de aumentar o consumo de energia, o fenómeno é causa frequente de patologias na envolvente dos edifícios, uma vez que constituem locais mais frios e que propiciam a ocorrência de condensações [32].

Os vãos envidraçados e portas são também elementos que assumem um carácter preponderante no comportamento térmico da envolvente, devido ao seu baixo isolamento térmico poder dar origem a perdas de calor por transmissão térmica e por infiltrações de ar importantes.

Nesta secção, as coberturas não serão objecto de estudo uma vez que no âmbito do presente trabalho não foi considerada a sua influência.

Como requisitos mínimos da qualidade térmica para a envolvente dos edifícios, o RCCTE [2] indica para a zona climática de Lisboa (I1), os coeficientes de transmissão térmica (U) máximos e valores de referência para a zona corrente representados no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Coeficientes de transmissão térmica máximos e de referência [2]

Elementos da envolvente	Val. Máximos (II)		Val. Referência (II)		Unid.
	Exteriores	Interiores	Exteriores	Interiores	
Zonas opacas horizontais	1,25	1,65	0,50	1,00	$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$
Zonas opacas verticais	1,80	2,00	0,70	1,40	
Vãos envidraçados	-		4,30		

### c) Ganhos Solares no Inverno

Apesar dos envidraçados serem normalmente o elemento da envolvente com menor isolamento térmico, estes possibilitam a transmissão da radiação solar para o interior, que no inverno permite compensar parte importante dessas perdas térmicas. A capacidade de um edifício em captar energia solar a partir dos vãos envidraçados nos meses de Inverno, possibilita a diminuição dos consumos de energia para aquecimento. Neste período, o efeito da radiação solar nos paramentos exteriores é favorável do ponto de vista das necessidades energéticas de aquecimento, uma vez que de uma forma “gratuita”, a simples incidência solar nos vãos envidraçados e paredes por si só contribuem para aquecer a habitação, sendo este último ponto negligenciado no actual regulamento português.

Neste contexto, a orientação da habitação adquire uma grande relevância no seu desempenho energético, sendo a solução mais vantajosa a orientação a Sul dos vãos envidraçados, uma vez que o percurso do sol no Inverno efectua-se para azimutes muito próximos do Sul geográfico (Figura 2.11 a). As restantes orientações no Inverno são menos relevantes uma vez que numa fachada orientada a Este e Oeste só recebem radiação solar de manhã e de tarde respectivamente e os ângulos de incidência do sol nas fachadas são elevados reduzindo assim o efeito da radiação (Figura 2.11 b). A Norte no período de Inverno, não existe nenhum tipo de radiação directa, apenas a radiação difusa, no entanto, no sentido de reduzir a influência das baixas temperaturas, é aconselhável reduzir as paredes e janelas orientadas a norte e aumentar as que estão orientadas a Sul [23].

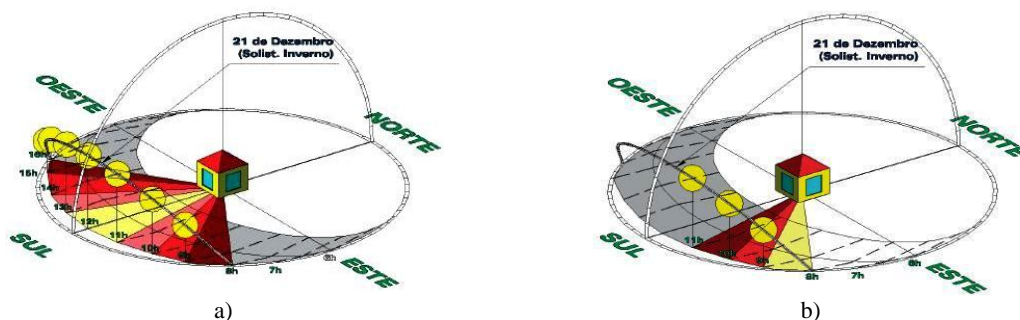


Figura 2.11 – Incidência solar Inverno: a) Fachada Sul; b) Fachada Sudeste [33]

#### d) Protecção Solar dos Vãos Envidraçados no Verão

No Verão, os elevados níveis de radiação solar incidentes nos elementos, podem fazer subir as temperaturas interiores das habitações para valores significativamente mais altos do que a temperatura do ar exterior [34]. A falta de protecções solares adequadas tem como consequência o sobreaquecimento no interior dos edifícios, sendo necessário recorrer a sistemas de arrefecimento que aumentam significativamente o consumo energético.

Na estação de arrefecimento é então necessário minimizar os ganhos solares, nesse sentido é de evitar fachadas com orientação a Este e a Oeste uma vez que estão expostas a longas horas de sol nos períodos de manhã e tarde respectivamente (Figura 2.12 b), sendo responsáveis por grandes cargas térmicas. Neste tipo de fachadas, deve haver um cuidado especial ao nível das áreas de parede e vãos envidraçados, o tipo de vidro e os dispositivos de sombreamento utilizados.

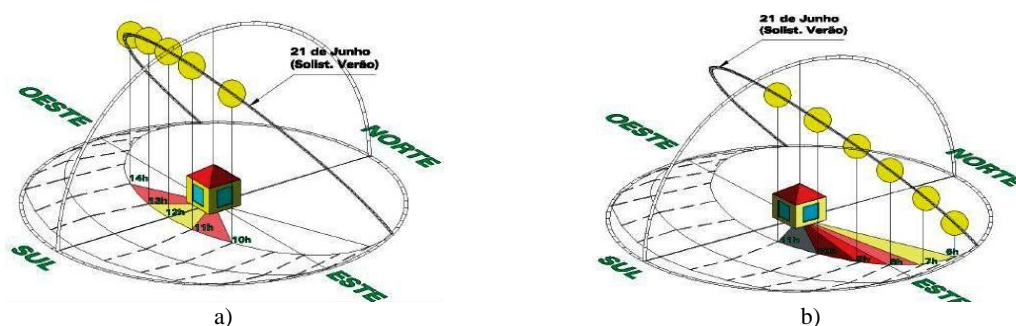


Figura 2.12 – Incidência solar Verão: a) Fachada Sul; Fachada Este [33]

Como é possível verificar pela Figura 2.12 b), o percurso do sol sendo próximo do zénite<sup>4</sup> a Sul, apresenta um ângulo de incidência com a normal de valor mais elevado [33]. Nessa perspectiva é mais fácil controlar a radiação incidente através de protecções para o sombreamento da fachada.

De acordo com o RCCTE [2] em edifícios novos ou grandes reabilitações, e de modo a controlar os ganhos solares na estação de arrefecimento, nenhum vão envidraçado da envolvente com área superior a 5% da área útil de pavimento (desde que não seja a Norte), pode apresentar um factor solar correspondente ao vão envidraçado com os dispositivos de protecção a 100% activos para a zona climática de Lisboa (V2) maiores do que 0,15 (inércia térmica fraca) e 0,56 (inércia térmica média e forte).

#### e) Inércia Térmica

A inércia térmica de um elemento, pode ser definida como a sua capacidade em armazenar calor e libertá-lo ao fim de um determinado período de tempo. Esta característica está associada a elementos constituídos por materiais densos e pesados, como por exemplo os tijolos maciços ou paredes de alvenaria de pedra. O calor retido em cada camada de parede vai elevar a sua

<sup>4</sup> Ponto da esfera celeste que se encontra na direcção da vertical ascendente ao ponto de observação.

temperatura e só depois passar esse calor às camadas adjacentes, havendo por isso retenção de calor, o que não seria possível acontecer numa parede com reduzida massa térmica [34]. De uma forma geral, o fenómeno associado à inércia térmica nos edifícios diz respeito à retenção de calor durante o dia, reduzindo o consumo de energia com arrefecimento, e por outro lado, a sua libertação durante a noite reduzindo a energia consumida no aquecimento da habitação.

Quando se perspectivam medidas de reabilitação para a envolvente opaca dos edifícios, o mesmo deve ser feito de modo a tirar o maior partido possível da inércia térmica subjacente às paredes, e por isso devem ser adoptadas soluções de isolamento pelo exterior, em que a massa que está em contacto com o interior do edifício é que interage com este e condiciona as variações de temperatura. O calor proveniente do ambiente interior tende a aquecer a parede, ficando retido na mesma devido ao isolamento exterior, e a tendência será a de aquecer novamente o interior. A solução de isolamento pelo interior bloqueia por completo esta interacção, não sendo aproveitada a inércia térmica da parede e só faz sentido a sua aplicação se for impossível a alteração do aspecto exterior da fachada, ou se a habitação não for de ocupação permanente uma vez que a resposta térmica é muito rápida pois o único elemento aquecido é o ar interior.

#### f) Ventilação

A ventilação assume um carácter importante nas perdas associadas à envolvente dos edifícios, uma vez que o processo não controlado pode aumentar significativamente as necessidades de aquecimento. Os edifícios devem por isso estar dotados de meios de ventilação para assegurar a qualidade do ar, o bom funcionamento dos aparelhos de combustão e minimizar o risco de ocorrência de condensações. O aumento dos níveis de humidade nos edifícios está directamente relacionado com a qualidade do ar interior<sup>5</sup>, causando desconforto dos seus ocupantes, e aumentando a probabilidade de aparecimento de patologias relacionadas com bolores.

Nos edifícios, a ventilação pode ser assegurada por meios mecânicos, por ventilação natural e por meios híbridos, este aspecto foi tratado com mais pormenor por Silva (2011) [35], salientando-se aqui apenas que a ventilação natural é por defeito um sistema com menor consumo de energia. Para intensificar a ventilação, é importante que os edifícios estejam dotados de folhas móveis para ventilação dos espaços e para promover o arrefecimento nocturno.

### **2.2.2. Conforto Térmico**

O tema da eficiência energética nos edifícios surge num contexto de redução do consumo efectivo de energia associada a equipamentos, com influência nos gastos energéticos com arrefecimento e aquecimento das habitações. Em todo este processo deve ser privilegiado acima de tudo o nível de

---

<sup>5</sup> Ar respirado pelas pessoas, sem causar riscos para a saúde e a qualidade do ar em que as pessoas não se manifestam insatisfeitas.

conforto térmico oferecido aos ocupantes, uma vez que quando é promovido o seu bem-estar, o grau de satisfação aumenta. Trata-se por isso de equilibrar as necessidades humanas aos gastos resultantes de melhoria do conforto na habitação.

Por definição o conforto térmico está directamente associado ao ambiente interior de um edifício sendo definido como: “a condição da mente que expressa satisfação com o seu ambiente térmico” [36]. O binómio temperatura e humidade relativa que nos faz sentir mais confortáveis em espaços interiores é variável, depende fortemente da temperatura média no exterior e de um vasto conjunto de outros factores climáticos.

O conforto térmico depende para além dos factores climáticos, de factores pessoais, no modo que o ocupante se adapta às condições térmicas do interior e finalmente aos factores físicos que dizem respeito ao modo como pode afectar o desempenho do espaço do edificado. A sensação de conforto térmico está relacionada com o equilíbrio térmico estabelecido entre o ambiente e o corpo humano no sentido de manter este último a uma temperatura próxima de 37 °C [37], assim como depende da adaptação fisiológica (aclimatização), expectativas e do comportamento dos ocupantes.

O equilíbrio termodinâmico entre o corpo humano e o ambiente é então associado à transmissão de calor e massa com o ambiente, sendo as variáveis mais importantes divididas em factores pessoais e ambientais como é possível verificar no Quadro 2.4 [38].

Quadro 2.4 - Factores que condicionam o conforto térmico

<b>Factores Pessoais</b>	<b>Factores Ambientais</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nível de actividade desenvolvida</li> <li>- Isolamento térmico e permeabilidade ao vapor de água do vestuário</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Humidade do ar</li> <li>- Temperatura do ar</li> <li>- Velocidade do ar</li> <li>- Temperatura radiante média das superfícies do contorno do espaço</li> </ul>

Os edifícios actualmente funcionam como o contexto físico de grande parte da vida quotidiana das pessoas uma vez que é neles que é passado a maior parte do tempo, sendo por isso obrigatório a busca das condições ideais de conforto térmico. No regulamento RCCTE [2] no seu artigo 14.º, é referido que as condições ambientes de conforto de referência estão associadas a uma temperatura do ar de 20 °C para a estação de aquecimento e de 25 °C para a estação de arrefecimento. No entanto, estes valores apesar de estabelecerem referências sobre as temperaturas óptimas para a obtenção de conforto térmico, podem no entanto não estar de acordo ou não servir de referência para todo o universo de cidadãos do nosso país. De acordo com Luís Matias (2011) [39], num estudo levado a cabo para conhecer o grau de satisfação das pessoas referente às temperaturas em que sentiam conforto térmico, os resultados excederam em média

cerca de 3 °C os valores de referência especificados no regulamento, isto é 17 °C no Inverno e 28 °C no Verão. Atendendo à maior adaptação das pessoas a temperaturas reduzidas (conforto adaptativo), as necessidades com aquecimento podem também diminuir em função da diminuição do número de graus-dia e dos meses estabelecidos para o período de aquecimento. Na Figura 2.3 apresenta-se a variação dos graus dias de aquecimento em 1995, para a cidade de Lisboa em função de temperaturas exteriores medidas experimentalmente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil [40].

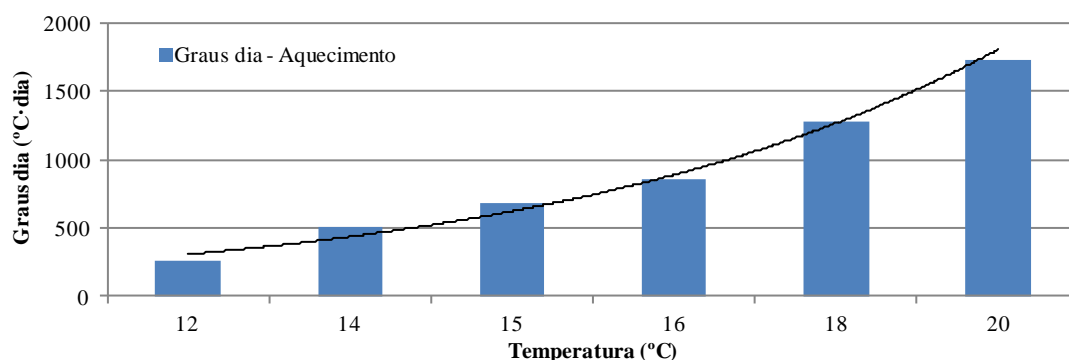


Figura 2.13 - Graus dia em função da temperatura (1995)

A avaliação da qualidade térmica dos projectos de edifícios pode ser definida no âmbito do conforto térmico, como a metodologia capaz de estabelecer o relacionamento entre os valores dos parâmetros térmicos característicos do projecto e os valores de referência fixados de forma a satisfazer as exigências de conforto dos seus utentes. De acordo com Santos (1989) [41], “Essa satisfação deve ser conseguida nas melhores condições económicas, considerando não só os custos iniciais de construção mas também afectos à exploração e manutenção, ou seja, fixando valores aceitáveis para a relação custo global/qualidade (...)”.

### 2.3. Fenómenos de Transmissão de calor

Para avaliar o comportamento térmico de um edifício ou espaço, é definido um volume de controlo correspondente ao volume interior ao qual são aplicados os princípios de conservação de massa e de energia. A transmissão de calor nos edifícios é um fenómeno complexo, que envolve as trocas de calor por radiação e convecção nas superfícies exteriores, a condução de calor pelos elementos sólidos e por fim a transmissão de calor por convecção e radiação para o volume de controlo. Atendendo à variação das condições de fronteira e à inércia do sistema, estes são fenómenos de regime dinâmico.

A transmissão de calor ocorre sempre que se estabelece um gradiente térmico entre duas faces opostas de um corpo ou dois materiais distintos, dando-se uma transferência de energia sob a forma de calor. O comportamento direccionado da transferência de calor dá-se sempre no sentido

do elemento de maior temperatura e energia, para o elemento com temperatura inferior, com conservação de energia, isto é, a quantidade de calor que o elemento mais quente transmite é igual ao recebido pelo elemento mais frio. Os conceitos apresentados neste subcapítulo, constituem a base para os cálculos realizados na avaliação dos fenómenos de transferência de calor existentes na habitação objecto de estudo, assim, serão de seguida apresentadas as bases teóricas do processo que sustentam o processo de transmissão de calor entre elementos.

### 2.3.1. Condução

A transmissão de calor por condução é um fenómeno que geralmente ocorre nos elementos sólidos, embora possa estar presente também em fluidos, ocorrendo transferências de calor de um ponto para o outro, ou de um corpo para o outro desde que seja promovido o contacto entre eles. O fenómeno da transmissão de calor por condução surge por via das colisões entre moléculas, sendo transferida a energia de um ponto com maior potencial energético (maior temperatura) para um de menor potencial (menor temperatura). Nesta perspectiva, a condução por um elemento pode dar-se em dois regimes distintos, permanente e dinâmico.

O estudo da transmissão em regime permanente de calor é importante no sentido da compreensão dos fenómenos mais complexos de transferência de calor e na definição de alguns parâmetros térmicos dos vários materiais que constituem um edifício. A expressão matemática que rege os fenómenos de transferência de calor por condução em regime estacionário e com fluxo de calor unidireccional é estabelecida pela lei de *Fourrier* (2.1), para um elemento de parede submetido a diferenças de temperatura uniformes nas suas faces ao longo do tempo, como é possível verificar pela Figura 2.14.

$$Q_{1-2} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\theta_1 - \theta_2}{\Delta x} \quad 2.1$$

Em que  $Q$  representa a quantidade de calor transmitida (W);  $\lambda$  a condutibilidade térmica do elemento ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $A$  a área da superfície ( $\text{m}^2$ );  $\theta$  a temperatura ( $^\circ\text{C}$ ), e  $\Delta x$  a espessura do elemento (m).

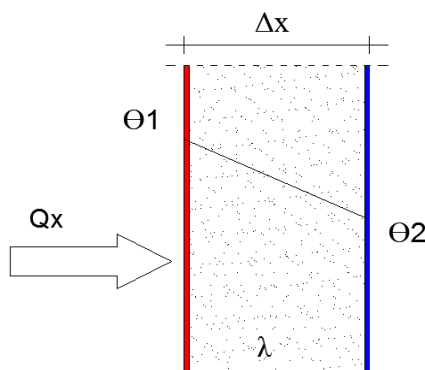


Figura 2.14 - Condução do calor em regime permanente e fluxo unidireccional [34]

Da expressão anterior resulta que o fluxo de calor que atravessa determinada superfície é proporcional ao produto entre a área do elemento e o gradiente de temperatura que ocorre nos meios sólidos, sendo a condutibilidade térmica a constante de proporcionalidade. O fluxo de calor para esta situação é admitido como sendo unidireccional, uma vez que as condições de fronteira são constantes ao longo do tempo, facto que numa situação real é difícil que estes pressupostos se mantenham, assumindo nestes casos muitas vezes um fluxo tridimensional. No entanto na térmica de edifícios, atendendo ao facto das condições de fronteira serem muito próximas das representadas na Figura 2.14 e a espessura dos elementos ser de uma forma geral consideravelmente menor do que as faces do mesmo, admite-se que o fluxo terá na maioria dos casos uma carácter unidireccional.

No cálculo térmico dos edifícios, o regime permanente de transferência de calor dificilmente é atingido dada a flutuação das temperaturas exteriores ao longo do tempo e da radiação solar que intervém nos paramentos exteriores, resultando alterações das condições durante determinados períodos de tempo, correspondendo esta situação ao carácter dinâmico. Para avaliar a transmissão de calor em regime dinâmico numa parede pode ser adoptado um método de diferenças finitas [42], adequado para um sistema de condução de calor em elementos opacos onde se verifiquem variações de temperatura ao longo do dia, como é o caso do regime estabelecido numa habitação.

Mediante a divisão da parede em várias camadas ou “nós”, pode ser calculada a temperatura nesses pontos em qualquer instante no tempo. A equação diferencial (2.2) traduz o princípio da conservação de energia em todo o domínio da zona opaca ao longo do tempo para regimes dinâmicos, sem geração interna de calor, sendo o ponto de partida para o cálculo da condução de calor em situações dinâmicas.

$$\rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad 2.2$$

Em que  $T$  representa o campo destinado à temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ );  $k$  a condutividade térmica equivalente do material ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), e  $x/y$  representa o sistema de eixos ortogonal e designam as localizações discretas dos nós. A equação (2.2) pode ser colocada na forma de equação de diferenças finitas, discretizada no espaço e num dado intervalo de tempo mediante a aplicação das equações (2.3) e (2.4), sendo a sua forma final dada pela equação (2.5). Na situação da ocorrência de um regime transiente, em materiais com propriedades constantes ao nível da sua condutibilidade térmica e a não geração de calor no seu interior, a equação é dada por (2.3):

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad 2.3$$

No entanto, além da equação em cima estar discretizada no espaço, deve também conter um incremento ao nível da discretização no tempo dado pela equação (2.4):

$$t = p \Delta t \tag{2.4}$$

Em que  $p$  representa os pontos discretos no tempo. A aproximação por diferenças finitas da derivada temporal na equação (2.3), é expressa por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} m, s \approx \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \tag{2.5}$$

O expoente  $p$  é usado para denotar a dependência do tempo na temperatura  $T$ , e a derivada temporal é expressa nos termos da diferença de temperaturas associadas ao novo tempo ( $p+1$ ) e o tempo anterior ( $p$ ). Substituindo a equação (2.5) na equação geral (2.3), a natureza da solução de diferenças finitas irá depender do momento específico em que as temperaturas são avaliadas pelas aproximações de diferenças finitas para as derivadas espaciais. Desta forma, para proceder à resolução da equação geral (2.3) existem métodos implícitos e explícitos, que permitem a determinação das temperaturas e fluxos de calor em pontos seleccionados no interior da parede em intervalos de tempo predefinidos. No presente trabalho, para determinar o comportamento dinâmico da parede foi utilizado o método implícito, que será desenvolvido no subcapítulo 5.4.

### 2.3.2. Convecção

O processo de transmissão de calor por condução num determinado elemento resulta das colisões internas entre moléculas vizinhas em função do estado energético da matéria, para o presente caso da transmissão de calor por convecção, o calor é transportado essencialmente pelas partículas de um fluido em movimento, correntes macroscópicas de fluido e não só por agitação molecular. Esta transmissão térmica está mais associada à transmissão de calor no interior de um fluido, ou entre um fluido e um sólido, que ocorre devido ao movimento das partículas.

O estudo da transmissão de calor por convecção, pressupõe o conhecimento acerca do movimento do fluido, dependendo se este movimento se realiza devido às diferenças de pressão provocadas por gradientes térmicos (convecção *natural*), ou se essas mesmas diferenças são relativas ou impostas por causas externas (convecção *forçada*). O primeiro caso diz respeito ao fenómeno que é originado pelo aquecimento de um fluido, que inicialmente se encontra em repouso e a uma temperatura uniforme, a partir do contacto com uma superfície que se encontra a uma temperatura mais elevada. Á desigualdade de temperaturas vai também corresponder uma desigualdade de densidades, resultando desta relação um equilíbrio de forças que provoca o movimento ascensional do fluido na vizinhança da superfície como é possível verificar pela Figura 2.15. A convecção forçada como o próprio nome indica, é realizada através de meios que forcem a movimentação de um fluido, como por exemplo, um ventilador ou até mesmo por intermédio de ventos atmosféricos.

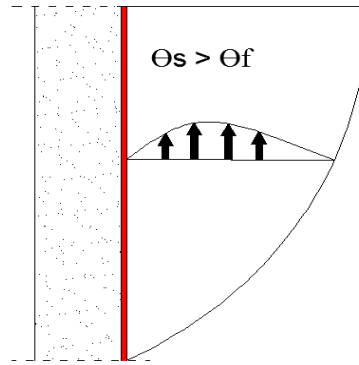


Figura 2.15 - Camada limite cinética em convecção natural [34]

Para determinar o fluxo de calor que é transmitido a um sólido ou fluido através da convecção é utilizada a lei de Newton de arrefecimento (2.6), que à semelhança das trocas de calor por condução é proporcional à área considerada e ao gradiente térmico instalado.

$$Q = h_c \cdot A \cdot (\theta_s - \theta_f) \quad 2.6$$

Em que  $Q$  representa a quantidade de calor transmitida (W);  $\lambda$  a condutibilidade térmica do elemento ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $A$  a área da superfície ( $\text{m}^2$ );  $\theta$  a temperatura ( $^\circ\text{C}$ ), e  $h_c$  traduz a condutância térmica superficial de convecção ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ), que depende da geometria, dimensão da secção e ainda do tipo de movimento do fluido que pode ser classificado como laminar ou turbulento conforme o deslocamento das partículas. Assim, através do produto entre o coeficiente  $h_c$  pela área e diferença de temperatura, podem ser traduzidas correctamente as trocas de calor envolvidas entre um fluido e a superfície de contacto.

### 2.3.3. Radiação

A transmissão de calor por radiação térmica é diferente das anteriores, nesta situação não é necessário qualquer meio físico para a realização do fenómeno. A radiação térmica pode ser então definida como a energia emitida por toda a matéria que se encontra a uma temperatura não nula, atribuída às mudanças na configuração electrónica dos átomos que constituem a matéria [43].

Por definição, todos os corpos emitem e absorvem radiações electromagnéticas de diferentes comprimentos de onda com uma intensidade que é função da sua temperatura absoluta e das propriedades da sua superfície. O mecanismo de transmissão de calor por radiação pode ser encarado como um transporte de energia por fotões que resulta da excitação das moléculas ou átomos do material, ou, pode ser associado a um transporte de ondas electromagnéticas, onde a radiação térmica abrange um domínio limitado do espectro total, parte do infravermelho, visível e ultravioleta correspondente aos comprimentos de onda entre 0,1 e 100  $\mu\text{m}$  [34].

A energia total emitida por um corpo radiante puro é dada pela lei de Stefan-Boltzman (2.7) aplicada a um corpo real:

$$Q_n = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad 2.7$$

Em que  $Q$  representa a quantidade de calor transmitida (W);  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzman e toma o valor de  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$  (W· m<sup>2</sup>·K<sup>-4</sup>);  $\varepsilon$  a emissividade da superfície emissora ( $0 < \varepsilon \leq 1$ );  $A$  a área (m<sup>2</sup>), e  $T$  a temperatura absoluta (K). Como é possível verificar pela equação em cima, a energia emitida é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta destacando-se desde logo este parâmetro em detrimento dos restantes.

No caso concreto dos edifícios, os fenómenos de transmissão de calor por radiação estão maioritariamente associados à radiação solar que incide na envolvente exterior, fachadas e cobertura e também no interior a partir dos vãos envidraçados. A radiação é então absorvida pelas superfícies e transformada em energia térmica e como consequência dá-se uma variação de temperatura nos elementos atingidos. Estes elementos em função da temperatura que atingem trocam radiação de longo comprimento de onda, com superfícies que se encontram no seu campo visual.

## **2.4. Ensaio para Avaliação do Comportamento Térmico dos Edifícios**

No sentido de avaliar o comportamento térmico dos edifícios, existe um conjunto de métodos que permitem estimar as necessidades energéticas associadas, uma vez que permitem caracterizar o nível de isolamento da envolvente do edifício. Estes ensaios são na sua maioria não destrutivos e podem incidir em vários pontos do edifício, permitindo conhecer as suas fragilidades e detectar atempadamente possíveis focos de patologias. Nessa perspectiva serão apresentados no presente subcapítulo, métodos experimentais passíveis de serem utilizados e os condicionamentos ligados à sua utilização.

### **2.4.1. Net Energy Input Method**

O método da energia fornecida ou *net energy input method*, tem por objectivo avaliar o desempenho térmico de edifícios através da determinação dos consumos de energia, possibilitando a determinação do coeficiente global de perdas de calor seja por condução, convecção, radiação e renovação do ar interior. A metodologia de ensaio e os parâmetros de medição, ainda que não exista qualquer referência aos equipamentos utilizados, são apresentados nos pontos seguintes de acordo com o estabelecido por M.D. Lyberg 1993 [44]:

- I. medição e monitorização da energia fornecida ao edifício e dos diferentes modos de transmissão de calor,  $E_{net}$ . Durante a estação de aquecimento (admitindo que a temperatura interior é sempre superior à exterior), o total de energia que é transmitida à habitação pode ser estimada pela soma dos seguintes factores:

- energia relativa aos sistemas de aquecimento da habitação,  $Q_h$  (W);
- quantidade de calor transmitido através dos ganhos solares,  $Q_{sol}$  (W);
- quantidade de calor casual gerado por equipamentos que ao funcionar libertam calor,  $Q_{el}$  (W), e
- calor gerado pelos ocupantes da habitação,  $Q_m$  (W).

Posto isto, a energia fornecida ao edifício  $E_{net}$  (W), é correspondente à soma de todos os componentes que nele se inserem e tem a seguinte configuração,

$$E_{net} = Q_h + Q_{sol} + Q_{el} + Q_m \quad 2.8$$

- II. medição e registo da diferença de temperatura entre o exterior e o interior,  $\Delta t$ ;
- III. relação através de um gráfico, da diferença de temperatura  $\Delta t$  e a quantidade de energia fornecido ao edifício na estação de aquecimento  $E_{net}$ ;
- IV. do conjunto de valores gerado, é traçada uma linha de tendência entre os pontos medidos e a origem, possibilitando assim determinar uma aproximação do coeficiente global de perda de calor pela envolvente, e
- V. comparar o valor experimental do coeficiente global de perdas de calor pela envolvente, com o valor calculado teoricamente através das áreas e os coeficientes de transmissão térmica (U) de cada elemento da envolvente exterior.

O período de medição deve ser realizado entre 5 a 10 dias. Este método possibilita a determinação do desempenho térmico dos edifícios em condições de aquecimento, fazendo uma relação entre a energia fornecida ao edifício e a diferença de temperatura no exterior e no interior do mesmo, conseguindo assim determinar as perdas pela envolvente e a quantidade de energia gasta. Segundo M. D. Lyberg [44], este método é tanto mais fiável quanto maior for a contribuição dos sistemas de aquecimento, visto ser o parâmetro mais controlável e de fácil medição comparativamente aos restantes.

#### 2.4.2. Termografia

A termografia é apresentada como um método capaz de aferir o comportamento térmico dos edifícios, com a realização deste ensaio é possível ter acesso a um conjunto de informações que permitem conhecer os pontos de menor isolamento dos edifícios e habitações e intervir de modo a melhorá-los e por consequência baixar os consumos de energia a ele associados. A análise termográfica procura detectar a existência de incoerências nos padrões de temperatura dos elementos da construção, quando analisados nas mesmas condições, esta diferença está normalmente associada à existência de patologias nos elementos construtivos. O ensaio de

termografia assenta no princípio da “fotografia térmica”, na qual é registada a imagem correspondente à radiação electromagnética de 0,1 até 100  $\mu\text{m}$  [45].

Para todas as temperaturas acima de zero absoluto (- 0 K e -273 °C), todos os materiais emitem pela sua superfície energia na forma de radiação com um espectro de diferentes comprimentos de onda e intensidades, isto é o mesmo que dizer que todos os materiais são emissores de radiação infravermelha. A radiação por eles emitida irá depender da sua temperatura e da emissividade da superfície do elemento. No sentido de converter o sinal emitido em forma de radiação proveniente das superfícies dos materiais, foram desenvolvidas câmaras sensíveis à radiação infravermelha que ao detectar a radiação, a convertem num sinal eléctrico que é posteriormente visível numa imagem térmica através do visor do equipamento. A informação proveniente dos equipamentos é transmitida em dois tipos diferentes de fotografia térmica, chamados termogramas [44]:

- **escala de cinzentos ou termogramas de cores**, onde o sombreamento da imagem se deve à diferença relativa na magnitude de radiação infravermelha relacionada com a diferença de temperatura. Normalmente áreas mais escuras são mais frias que áreas mais claras, e,
- **termogramas com isotérmicas** que indicam pontos, linhas ou áreas com a mesma temperatura para o mesmo material.

As condições térmicas a que um edifício está exposto durante a aplicação do método são muito importantes para o sucesso do ensaio, devem ser por isso respeitadas algumas recomendações. O registo de dados pode ter lugar dentro ou fora do edifício, mas para medições mais precisas devem ser realizadas no interior de modo a minimizar a interferência do clima exterior. De uma forma geral e para otimizar os resultados dos ensaios, devem ser respeitadas as seguintes orientações [45]:

- I. pelo menos durante 24 horas antes e durante a realização do ensaio, a diferença de temperatura entre o interior e o exterior deve ser de pelo menos de 10 °C. A variação da temperatura do ar exterior deve ser pequena e do ar interior não deve variar mais de +/- 2 °C;
- II. pelo menos nas 12 horas antes e durante o ensaio, a fachada do edifício não deve estar exposta a radiação solar suficiente que possa alterar os resultados, não devendo também a fachada estar visivelmente molhada, e
- III. para a medição correcta das pontes térmicas, a pressão interior terá de ser menor que a exterior pelo menos 10 Pa.

Usando o método da termografia muitos aspectos relativos às perdas de calor do edifício podem ser visualizados e identificados, as câmaras termográficas de infravermelhos permitem num exame não destrutivo, detectar e localizar patologias existentes no edifício como humidades, fendas estruturais, detecção de vazios no interior dos materiais e singularidades associadas às

fachadas como pontes térmicas e ausência de isolamentos em fachadas. Na Figura 2.16, apresenta-se uma fotografia térmica retirada de um pavilhão situado no LNEC.

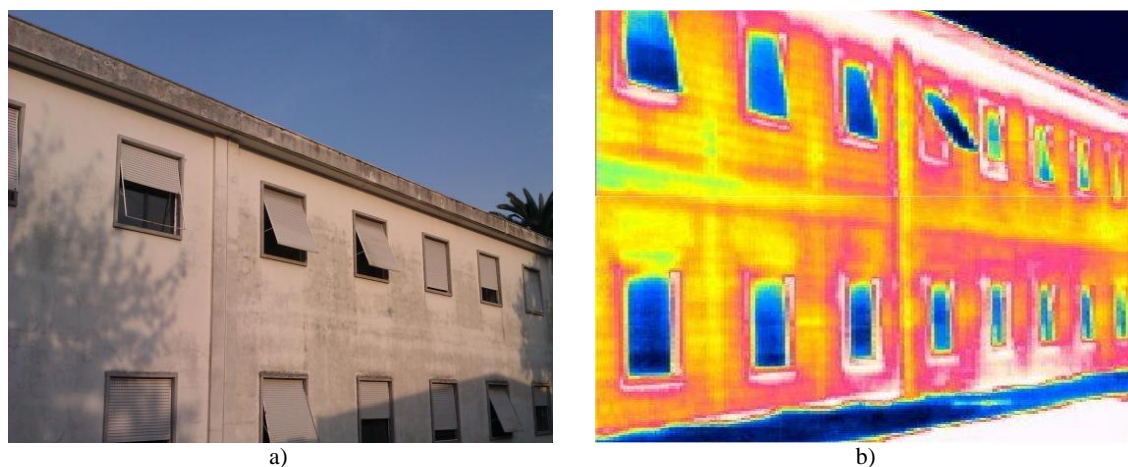


Figura 2.16 – Exemplo de termograma de cores: a) Fotografia normal; b) Fotografia térmica [Fonte: Doutor Luís Matias, LNEC]

No sentido de determinar o coeficiente de transmissão térmica da parede, este método pode revelar-se uma ferramenta de grande utilidade quando combinado com o método do fluxímetro, usando os termogramas provenientes da fotografia térmica como um guia para a colocação dos fluxímetros em áreas representativas da envolvente do edifício.

#### 2.4.3. Ensaios de Pressurização

O ensaio de pressurização permite determinar a permeabilidade ao ar da envolvente e assim identificar o risco de existirem elevadas infiltrações de ar. A caracterização e quantificação das trocas de ar pode ser realizada através de determinado elemento construtivo ou conjunto de elementos associados à envolvente dos edifícios, quer sejam aberturas eventuais ou frinchas nas paredes, medindo a resistência das mesmas ao atravessamento do ar, o comportamento dos vãos envidraçados (caixilharia + vidro) e portas em contacto com o exterior.

O princípio de funcionamento deste ensaio consiste na imposição de diferenciais de pressão conhecidos entre os dois lados de um elemento construtivo, medindo os caudais e estabelecendo uma correlação entre os resultados obtidos para a diferença de pressão para fluxo zero ( $\Delta p$ ) e o caudal de ar ( $Q$ ) [46]. No sentido de aferir as condições de permeabilidade de um edifício na sua globalidade e estimar directamente a área total das aberturas ou frinchas e a respectiva permeabilidade ao ar, deve ser utilizado um método denominado como “ensaio da porta ventiladora”. A partir deste método é possível caracterizar a permeabilidade ao ar da envolvente de um edifício, por meio de medições do fluxo de ar do exterior para o interior (pressurização) e/ou do interior para o exterior (despressurização) [47]. O ensaio é realizado com recurso a uma porta amovível e um ventilador cujas características ( $q$ ,  $\Delta p$ ) devem ser previamente conhecidas,

estes equipamentos são colocados e fixos no vão da porta do compartimento que se pretende analisar em substituição da porta existente como é possível verificar na Figura 2.17. É também usual neste tipo de ensaios utilizarem-se gases de fumo colorido introduzidos no interior do espaço a ensaiar, que possibilitam identificar os locais onde existem aberturas significativas na envolvente. Para além dos equipamentos já referenciados, são necessários também anemómetros que possibilitam a medição da velocidade do ar, termómetros para medição da temperatura e finalmente barómetros para controlo da pressão do espaço.



Figura 2.17 - Ensaio da porta ventiladora [35]

A partir dos *outputs* do ensaio, podem ser previstos os valores médios da taxa de infiltração  $R_{ph}$  ( $\text{h}^{-1}$ ) por intermédio da seguinte equação:

$$R_{ph} = \frac{Q}{V} \quad 2.9$$

Em que  $Q$  representa o caudal do ar ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), e  $V$  o volume do espaço interior ( $\text{m}^3$ ). O caudal de ar é dado pela seguinte equação:

$$Q = C \cdot (\Delta p)^n \quad 2.10$$

O coeficiente  $\Delta p$  representa a diferença de pressão para fluxo zero e é determinado usando o barómetro de pressão e os coeficientes  $C$  e  $n$ , que resultam das curvas de pressurização e/ou despressurização resultantes dos respectivos ensaios.

No que diz respeito aos valores recomendáveis sobre esta matéria, o RCCTE [2] refere no seu Artigo 14.º que a taxa de referência para a renovação do ar para a garantia da qualidade do ar interior é de 0,6 renovações por hora. No âmbito deste ensaio, é possível desde logo verificar se são ou não cumpridas estas exigências regulamentares bem como determinar a eficiência de um edifício antes e depois de acções de reabilitação da envolvente, realizando estimativas de consumo de energia e da qualidade do ar interior.

## 2.5. Determinação Experimental do Coeficiente de Transmissão Térmica ( $U$ )

No âmbito do presente trabalho, um dos objectivos prende-se com a avaliação experimental das características térmicas das paredes de um edifício “Gaioleiro”, através do método do fluxímetro. Nesse sentido torna-se fundamental a recolha de informação acerca dos trabalhos já realizados através da aplicação do referido método e com isso retirar informação importante acerca das metodologias utilizadas, tratamento de dados e principais resultados, assim como os possíveis erros que possam estar associados às leituras dos equipamentos. Os trabalhos experimentais aqui referidos têm por base a determinação das características térmicas de elementos utilizados na construção de edifícios (paredes, coberturas e isolamentos), nomeadamente do coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ). O método do fluxímetro que está igualmente na base da determinação das características térmicas das paredes do “Gaioleiro” será abordado em detalhe no subcapítulo 4.2 do presente trabalho.

### 2.5.1. Medição do Coeficiente De Transmissão Térmica - Edifícios Tradicionais

Este estudo foi realizado por Baker (2007) [48] e teve como objectivo a medição do coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) em edifícios tradicionais, realizado entre as datas de 2007 e 2010 de modo a caracterizar os desempenhos térmicos de elementos de construção tradicionais de paredes de pedra e argamassa de cal antigas. O estudo envolveu medições “*in situ*” e posteriormente procedeu-se à sua comparação com os valores de  $U$  calculados a partir de programas de cálculo como o *BuildDesk6* ou *BRE U-Value Calculator7*. Estes programas utilizam frequentemente valores por defeito para elementos da envolvente com estas características, assumindo que possuem um carácter homogéneo em toda a sua espessura. Os valores de  $U$  que resultam do cálculo dos *softwares* térmicos, são normalmente direccionados para a construção não-tradicional pelo que era necessário ajustar os valores, quando usados para avaliar edifícios tradicionais.

A investigação realizada teve como principal propósito dar a conhecer resultados que irão certamente ajudar os profissionais da construção e avaliadores do desempenho energético, na tomada de decisões com base em informações experimentais. O estudo levado a cabo por Paul Baker, consistiu na medição “*in situ*” e cálculo dos coeficientes de transmissão térmica de 67 elementos da envolvente com e sem isolamento (57 paredes, 9 coberturas e 1 pavimento), utilizando fluxímetros para leitura do fluxo de calor e de sensores de temperatura nas faces dos elementos. O estudo permitiu então a comparação entre os  $U$  medidos e os seus equivalentes calculados, tendo sido concluído que os *softwares* utilizados como auxiliares de cálculo tendem a sobrestimar os valores de  $U$  de elementos de construção tradicionais. Assim sendo, os elementos medidos possuem um comportamento melhor do que o inicialmente esperado, evidenciando a necessidade de recorrer a estudos “*in situ*” para caracterizar convenientemente as propriedades

térmicas de materiais de construção tradicionais e não-tradicionais e os seus componentes de construção.

### **2.5.2. Avaliação do Comportamento Térmico de Edifícios de Habitação**

O trabalho experimental da autoria de Ribeiro (2009) [49] teve por base a “Avaliação do Comportamento Térmico de Edifícios de Habitação com Recurso a um Termofluxímetro”, no âmbito de uma tese de mestrado. Este estudo teve então como principal objectivo, a comparação entre os valores convencionais calculados em projecto do coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) das paredes exteriores de edifícios de habitação e os valores medidos experimentalmente “*in situ*” na cidade de Vila Real.

Os ensaios foram realizados durante os meses de Novembro de 2008 e Julho de 2009 e incidiram em oito tipos de parede de diferentes habitações. As paredes alvo de estudo possuem diferentes características, foram analisadas paredes simples de alvenaria e paredes duplas com e sem isolamento térmico pelo exterior e na caixa-de-ar das paredes. Neste trabalho experimental não foram realizadas alterações forçadas de temperatura no interior das habitações, uma vez que os ensaios ocorreram na sua maioria com temperaturas baixas no exterior e estando as habitações ocupadas, por si só garante o gradiente térmico entre interior e exterior. De referir também que neste trabalho não foram consideradas correcções ao fluxo medido pelos equipamentos devido à inércia térmica das paredes.

O trabalho experimental, demonstrou acima de tudo a existência de uma convergência entre os valores obtidos de  $U$  pelo ensaio “*in situ*” e os calculados, reforçando por outro lado a ideia de que o método do fluxímetro pode ser utilizado no sentido de aferir as reais características térmicas de um elemento desde que se estabeleça um diferencial de temperatura entre o interior e o exterior das habitações. Na prática, o referido trabalho é mais um valioso contributo no âmbito da avaliação e certificação energética de edifícios, uma vez que contribui para a validação dos valores indicados nos regulamentos em vigor.

### **2.5.3. Fontes de Erro na Medição Experimental do $U$**

No âmbito da tese de mestrado da autoria de Simioni (2005) [50], foi realizada uma análise dos erros associados à medição do coeficiente de transmissão térmica em elementos através do método experimental do fluxímetro, realizada em laboratório.

Neste trabalho experimental, o estudo incidiu particularmente em materiais de construção conhecidos, cuja condutibilidade térmica varia entre os 0,04 e 1,0  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ . Para os referidos materiais foi criado um modelo matemático, onde é estudada a influência do material, da espessura da amostra, do isolamento lateral da amostra e do fluxímetro, do coeficiente de troca de

calor por convecção e do material que constitui o fluxímetro. Deste trabalho experimental resultaram indicações importantes acerca dos erros que poderão estar associados a leituras através do método do fluxímetro. Através das simulações realizadas, verificou-se que a principal fonte de erro nas medições tem a ver com a espessura e o material da amostra. Quanto maior a condutibilidade térmica da amostra, menor é o erro, ao passo que quanto maior a espessura de amostra, maior é o erro na medição da condutibilidade térmica. Outra das conclusões que pode ser retirada deste trabalho experimental é o facto do coeficiente de trocas de calor por convecção ter influência significativa nos erros de medição uma vez que quanto mais elevados forem, maiores são os erros gerados.

De uma forma geral as principais conclusões do trabalho experimental consultado, revelam que as grandes fontes de erro podem ser diminuídas, sendo fundamental maximizar o isolamento lateral e a dimensão do anel de guarda do fluxímetro, reduzir o coeficiente de trocas de calor por convecção bem como a condutibilidade térmica do fluxímetro. Estes aspectos tornam-se muito importantes ter em conta no sentido de diminuir o erro das leituras experimentais a realizar a partir deste método, de modo a obter leituras das condutibilidades térmicas dos materiais que correspondam ao verdadeiro comportamento do mesmo.



### 3. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO ESTUDADO

#### 3.1. Aspectos Gerais

O estudo centrou-se num edifício do tipo “Gaioleiro” de carácter histórico na cidade de Lisboa e com perspectivas de reabilitação. Não foi possível determinar a data de construção do mesmo sendo por isso a sua identificação realizada com base nas características estruturais e arquitectónicas encontradas e o rigor de construção evidenciado. A partir do existente, estima-se que o edifício objecto de estudo tenha sido construído na época de transição entre o período de construção Pombalino e “Gaioleiro”, encontrando-se eventualmente na fronteira qualitativa referente às duas épocas. O edifício apresenta traços arquitectónicos e estruturais que marcaram a época Pombalina, mantendo as linhas de orientação desse tipo de construção, no entanto, é também evidente o descuido no processo construtivo de alguns elementos estruturais e a aplicação de materiais de qualidade inferior que constituem o edifício, remetendo assim a sua classificação para edifício “Gaioleiro”.

Segundo as informações recolhidas, o edifício encontra-se desabitado desde 2005 e está um pouco degradado, fruto do abandono a que foi sujeito ao longo do tempo e por não haver sinais de qualquer acção de reabilitação ou conservação.

#### 3.2. Localização do Edifício e Clima

O edifício estudado situa-se na cidade de Lisboa, nos nº 29, 31 e 33 da Rua Jardim do Tabaco pertencente à freguesia de Santo Estêvão do concelho e distrito de Lisboa, perto da zona ribeirinha da cidade e da baixa Lisboaeta (Figura 3.1). O imóvel encontra-se numa zona classificada pelo plano director municipal de Lisboa como *Área Histórica Habitacional*, sendo ainda abrangido pela Zona de Protecção de Imóveis do IPPAR. Situa-se ainda nas Servidões Administrativas dos seguintes imóveis:

- zona de protecção do castelo de S. Jorge e restos das cercas de Lisboa. Classificado como Monumento Nacional pelo Decreto de 16/06/1910;
- planta de classificação do espaço urbano em área histórica habitacional I – Área de potencial valor arqueológico de nível 2 do PDM de Lisboa, e
- abrangido pela categoria de protecção IV na carta síntese do Plano de Urbanização do núcleo histórico de Alfama e Colina do Castelo.



Figura 3.1 - Localização do edifício estudado: a) Planta; b) Fotografia aérea [Fonte: Google Earth]

O “Gaioleiro” encontra-se numa zona da cidade bastante movimentada, caracterizada pela baixa altitude e proximidade ao estuário do rio Tejo. A edição de 1834 da Planta da cidade de Lisboa (Figura 3.2), que resulta do levantamento topográfico da cidade realizado em 1807, mostra que o local onde foi construído este edifício era uma praia, tendo sido necessário a execução de um aterro para a construção do mesmo, identificado através das prospecções geotécnicas realizadas ao local e que adicionalmente posicionaram a data da sua construção no século XIX [51].

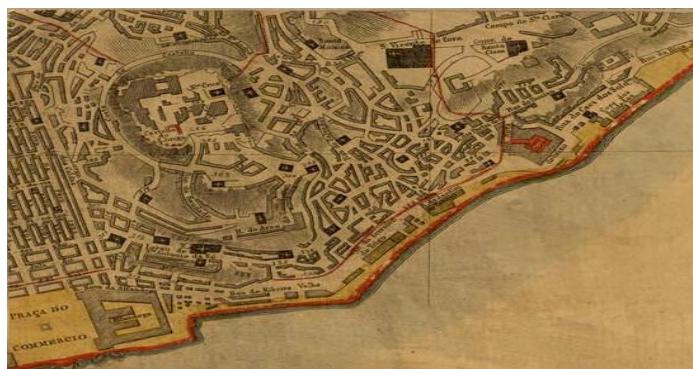


Figura 3.2 - Planta da cidade de Lisboa e de Belém (1834) [Fonte: Biblioteca Nacional]

A zona que envolve o edifício é caracterizada pela existência de tráfego rodoviário nas suas fachadas principal e posterior, e pela existência de um número significativo de edifícios de habitação e serviços correspondentes à mesma época de construção ao longo da rua do jardim do tabaco.

O edifício estudado encontra-se confinado entre dois edifícios de habitação que se estima serem do mesmo período histórico, o pé direito de cada piso característico é consideravelmente maior que o piso estudado, e consequentemente apresentam uma cota da cobertura superior ainda que todos tenham igual número de pisos. O “Gaioleiro” encosta totalmente ao longo da sua empena esquerda ao edifício adjacente, sendo que a empena do lado direito está em parte separada do edifício adjacente por intermédio de um saguão que “desliga” parte das empenas dos edifícios a partir do piso 0 até à cobertura, aumentando progressivamente a área em função da altura. O referido saguão tem como função principal a introdução de luz solar e a renovação do ar no

interior do edifício, cujas habitações são mais compridas do que largas. É de referir também, que ambos os edifícios são bastante mais compridos que o estudado em 10 metros (empena esquerda) e 30 metros (empena direita). A fachada principal deste edifício está orientada a Noroeste (NO) para a Rua do Jardim do Tabaco onde do outro lado da via, a aproximadamente 13 metros, se encontra um edifício de serviços de maior altura. A fachada posterior é orientada a Sudeste (SE) e encontra-se completamente desafogada numa perspectiva de um alinhamento horizontal, tendo somente barreiras laterais que correspondem aos maiores comprimentos das empenas dos edifícios adjacentes.

No que diz respeito aos zonamentos climáticos estabelecidos no RCCTE [2], o país está dividido em três zonas climáticas de Inverno e de Verão, em que no caso específico do Verão, as três zonas são ainda subdivididas em Norte e Sul. As referidas zonas climáticas correspondem fundamentalmente a locais com estações mais ou menos severas, as temperaturas atingem picos de calor ou de frio que são importantes diferenciar de modo a estabelecer limites de energia necessária para aquecer ou arrefecer determinada habitação ou edifício.

O edifício estudado situa-se na cidade de Lisboa, a uma distância superior a 5 km da costa marítima. A localidade onde está inserido é caracterizada por estar numa zona climática de Inverno correspondente a I<sub>1</sub>, o número de graus-dia de aquecimento é 1190 °C·dia (na base dos 20 °C), correspondente à duração da estação de aquecimento com 5,3 meses. No que diz respeito ao Verão, esta zona é correspondente a uma zona V<sub>2</sub> pertencente à região Sul (Quadro III.1, RCCTE[2]). O zonamento climático de Portugal continental para a situação de Inverno e Verão é dado pela seguinte figura:

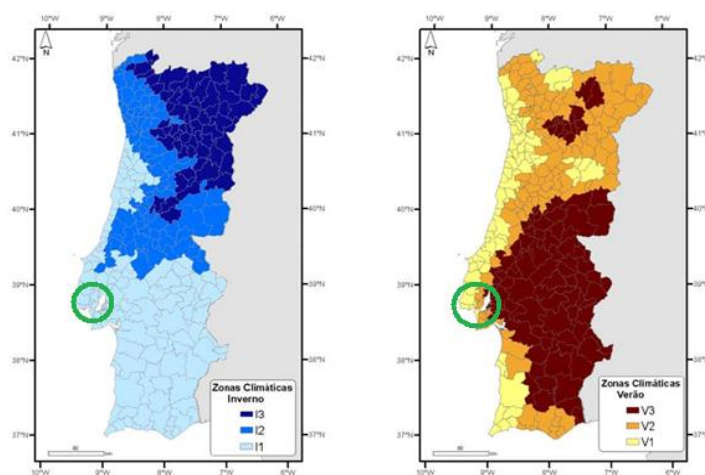


Figura 3.3 - Zonamento climático de Portugal Continental (Inverno e Verão)

É também possível determinar através do zonamento climático, a energia solar média mensal incidente numa superfície orientada a Sul na estação de aquecimento que no caso específico do presente edifício é de 108 kWh·m<sup>-2</sup>·mês, prevista no regulamento (Quadro III.8). Ao nível dos valores médios de temperatura do ar exterior e da intensidade da radiação solar para as diferentes

orientações da fachada na estação de aquecimento onde se insere o edifício (V<sub>2</sub> Sul), são conforme o Quadro 3.1:

Quadro 3.1 - Valores médios de temperatura do ar exterior e radiação solar (Fonte: RCCTE)

Zona	T <sub>média</sub>	NO	SE
V2-S	23 °C	340 kWh·m <sup>-2</sup>	460 kWh·m <sup>-2</sup>

### 3.3. Caracterização das Soluções Construtivas

O edifício “Gaioleiro” apresenta uma área de implantação de aproximadamente 110 m<sup>2</sup> e é constituído por 5 pisos elevados, piso de esteira incluído. À excepção do piso térreo, destinado a comércio, tanto os pisos correntes como as águas furtadas, destinam-se a habitação, formalizando uma habitação autónoma em cada piso. O piso de esteira constitui uma zona ampla de entrada no edifício que assegura o acesso aos demais pisos através de uma escada em madeira (única no edifício), existe também um espaço independente da zona de entrada, que corresponde a uma superfície destinada ao comércio que possui um logradouro onde se desenvolvem duas arrecadações com cerca de 14,4 m de profundidade total média. O pé direito deste piso é de 4,5 m e constitui a zona mais alta do edifício uma vez que nos restantes pisos o pé direito médio é de 3,0 m para os pisos 1 a 3 e pé direito variável nas águas furtadas. As habitações por piso são constituídas por quatro quartos, sala, casa de banho e cozinha, perfazendo uma área útil total de aproximadamente de 75,45 m<sup>2</sup>.

O edifício mantém a estrutura original, sem quaisquer intervenções de reforço ou reabilitação, no entanto, segundo os documentos consultados existe uma referência relativamente à ampliação de um piso realizada em época não definida. O estado de degradação do edifício é perceptível através dos elementos de madeira que revelam um desgaste devido ao ataque de fungos e de humidades, afectando a estrutura vertical e horizontal levando à deformação excessiva dos pavimentos.

A fachada principal do edifício possui revestimento exterior de azulejo cerâmico de cor azul, as portas do piso do rés-do-chão e os vãos envidraçados dos diversos pisos são contornados por pedra de cantaria de calcário de cor clara. De referir que os três pisos correntes possuem varandas de pedra de calcário e o gradeamento em ferro forjado. No primeiro piso existem três consolas independentes com cerca de 2 m de largura cada, no segundo piso duas com 2 m cada uma e no terceiro piso uma única que percorre toda a largura do edifício, com aproximadamente 7,7 m.

A fachada tardoz ou posterior, tem como revestimento uma fina camada de reboco de argamassa de cal e areia de cor média fruto do desgaste a que tem sido sujeita ao longo do tempo, esta fachada contempla três varandas iguais, uma em cada piso corrente com cerca de 5,3 m. A parede do saguão é igualmente rebocada com argamassa de cal e areia.



Figura 3.4 - Fachadas do edifício estudado: a) Principal; b) Tardoz; c) Saguão

A estrutura vertical do edifício (paredes de contorno exterior, fachada, empenas e a parede da zona de entrada do edifício de separação com o espaço comercial), são constituídas por alvenaria de pedra irregular de calcário macio, tijolo cerâmico e argamassa de cal e areia. O reconhecimento dos materiais que constituem as paredes do edifício, resultam de uma inspeção visual através da abertura de roços mais ou menos profundos e de alguns destacamentos pontuais do reboco como é possível verificar através da Figura 3.5.

As paredes de fachada e empena são caracterizadas por possuírem uma elevada espessura visto constituírem as paredes-mestras do edifício. A espessura das paredes de fachada no arranque do piso de esteira é cerca de 0,90 m, reduzindo com a altura do edifício para 0,84 m, 0,77 m e 0,64 m para os pisos 1, 2 e 3 respectivamente, a parede de empena relativa ao saguão varia entre os 0,80 m, 0,74 m e 0,55 m para os pisos 1, 2 e 3. Na fachada principal e na empena existem paredes de peitoril com 0,27 metros de espessura. A redução da espessura em altura deve-se fundamentalmente a questões relacionadas com a economia e a redução do peso próprio da estrutura em altura, esta variação tem ainda a vantagem de permitir o apoio dos pavimentos aproveitando os ressaltos para além de possibilitar o aumento das áreas úteis do pavimento [11]. Dada a impossibilidade de determinar a espessura das paredes em contacto com edifícios adjacentes, estimou-se que as mesmas têm uma espessura de 1,5 m referentes à junção de duas paredes de envolvente.

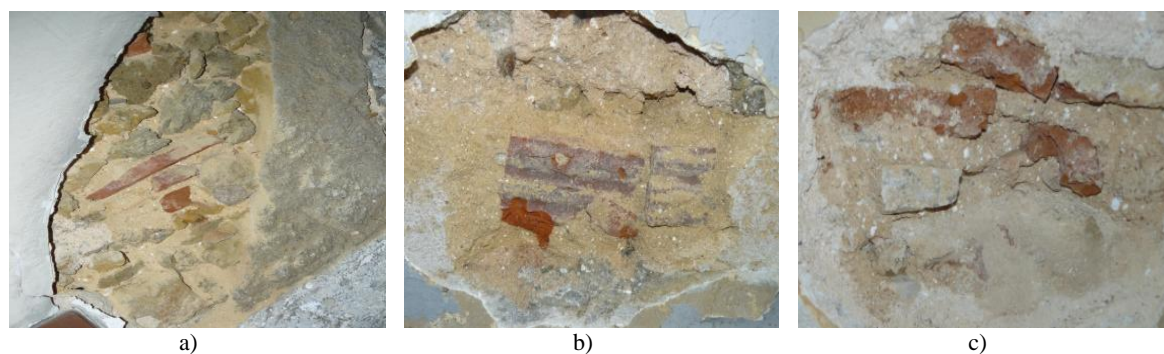


Figura 3.5 - Constituição das paredes: a) Piso de esteira (0,90 m); b) Saguão (0,74 m); c) Saguão (0,27 m)

A estrutura vertical dos pisos elevados é também constituída por paredes de frontal pombalino e de tabique, de um modo geral as paredes que suportam os vigamentos de madeira são de frontal sendo as restantes de tabique. As paredes de frontal têm na sua constituição a cruz de Santo André Pombalina, e ainda que não apresentando o cuidado típico do período pombalino, são compostas por elementos de madeira verticais (prumos), horizontais (travessas ou travessanhos) e diagonais (escoras) como representado na Figura 3.6 a). Estas paredes de 0,20 m de espessura, são embebidas em alvenaria de tijolo com argamassa de cal e areia, e possuem funções estruturais e de compartimentação interior nas habitações, em conjunto com as paredes de tabique (ver anexo A, desenho D1). As paredes de tabique são elementos de menor espessura com cerca de 0,10 m e 0,15 m que não tendo qualquer função estrutural, apenas servem como paredes divisórias das habitações. Estes elementos são constituídos por tábuas de madeira ao alto apresentando também um fasquiado de madeira rebocado, como é possível verificar na Figura 3.6 b).



Figura 3.6 – Paredes de compartimentação: a) Parede de frontal; b) Parede de tabique

Os vãos envidraçados das habitações são os elementos originais do edifício, constituídos por elementos de madeira e vidro simples incolor, apresentando sinais de degradação e empenamento. Quanto à forma, os vãos são de sacada (Figura 3.7 a), nas fachadas principal e de tardoz dos diversos pisos elevados, e de peitoril (Figura 3.7 b) para o saguão e na fachada principal da habitação do piso 2. De referir ainda, a existência de uma janela com caixilharia em alumínio e vidro simples (Figura 3.7 c) na casa de banho da habitação do piso 2 e de madeira nos restantes.



Figura 3.7 – Janelas características do piso 2: a) Sacada; b) Peitoril; c) Casa de banho

A estrutura horizontal do edifício é constituída por pavimentos de madeira com soalho simples ou duplo, suportado por vigamentos do mesmo material na direcção perpendicular às fachadas principal e posterior, formando uma caixa-de-ar como é possível verificar pela Figura 3.8 com uma espessura de 0,25 m, sendo vulgar nestas situações a utilização de vigamentos em peça única em toda a profundidade do edifício. Os pavimentos das diversas fracções encontram-se bastante degradados, existindo na maioria dos casos, deformações excessivas fruto de patologias associadas à humidade e ao ataque dos fungos.



Figura 3.8 – Pavimento de madeira: a) Face superior; b) Face inferior

Os revestimentos inferiores dos pavimentos correspondem aos tectos das habitações dos pisos adjacentes, sendo que nas zonas comuns como, sala e hall de entrada, são constituídos por um fasquiado de madeira perpendicular ao vigamento pregado às faces inferiores das vigas e rebocado com uma argamassa de cal e areia e finalmente estucados como representado na Figura 3.9 a). Nas zonas não comuns como os quartos, o revestimento é constituído por pranchas de madeira dispostas perpendicularmente à orientação dos vigamentos ( Figura 3.9 b).



Figura 3.9 – Tecto característico das fracções: a) Acabamento em estuque; b) Acabamento em pranchas de madeira

As escadas do edifício são igualmente constituídas por madeira sendo o núcleo interior da caixa de escadas delimitada por uma parede de empena, a parede que lhe é paralela é de tabique, e separa a caixa de escadas das habitações. As duas paredes perpendiculares que suportam os vigamentos de madeira correspondem a uma parede de frontal e a uma parede de tabique.

A cobertura da caixa de escadas possui uma clarabóia que promove a entrada de luz solar para o seu interior e a ventilação da caixa de escadas é assegurada essencialmente por uma abertura com grelhas na porta de entrada (Figura 3.10).

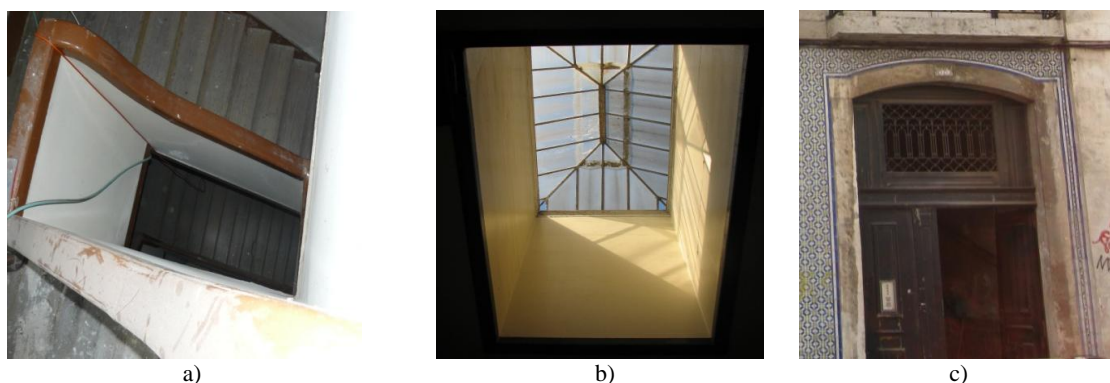


Figura 3.10 - Caixa de Escadas: a) Escadas de Madeira; b) Clarabóia; c) Grelhas de admissão de ar

A cobertura é composta por duas águas principais com águas-furtadas e uma outra secundária que converge as águas para o saguão do edifício e é constituída por telhas cerâmicas que se apoiam numa estrutura principal de madres de madeira. As madres da estrutura da cobertura apoiam-se nas paredes de contorno exterior e nas paredes de frontal interiores.

Na cozinha existe uma chaminé para exaustão dos gases resultantes da confecção dos alimentos e possui a particularidade de nas zonas que contactam com o exterior, estarem revestidas a azulejo cerâmico até 1,5 m de altura. No que diz respeito à casa de banho, as paredes são todas forradas a azulejo cerâmico e a ventilação da instalação sanitária é assegurada por uma janela.

Para caracterizar termicamente a habitação, é necessário definir alguns parâmetros relativamente aos materiais que a constituem. Assim sendo, apresentam-se no Quadro 3.2, as condutibilidades térmicas equivalentes de elementos da envolvente do edifício e o factor solar do tipo de vidro que é característico da habitação. As referências utilizadas para determinar os valores utilizados, constituem valores convencionais do ITE 54 [5], ITE 50 [52], EN 12524 [53] e RCCTE [2].

Quadro 3.2 – Características térmicas de materiais dos elementos da envolvente

<b>Características Térmicas Convencionais dos Elementos da Envolvente</b>			
<b>Elementos</b>	<b>Referências</b>	<b>Características</b>	<b>Unidades</b>
Parede Alvenaria	ITE 54	$\lambda_{eq.} =$	1,76
Argamassa de Cal e Areia	EN 12524	$\lambda_{eq.} =$	0,80
Azulejo Cerâmico	ITE 50	$\lambda =$	1,30
Madeira Semi-Densa	ITE 50	$\lambda =$	0,18
Cantarias - Calcário Macio	ITE 50	$\lambda =$	1,10
Vidro Simples	ITE 50	$\lambda =$	1,00
	RCCTE	$g^{\perp} =$	0,85

(W·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>)

-

A classe de inércia térmica de uma fracção é obtida em função da sua massa térmica (anexo VII do RCCTE [2]). O cálculo da massa térmica da habitação ( $I_t$ ) é dado pelas massas superficiais dos diferentes elementos de construção, obtidos através das tabelas técnicas [54].

O cálculo da massa térmica associada à habitação, é obtida através da equação (3.1)

$$I_t = \frac{\sum Ms_i \cdot S_i}{A_p} \quad 3.1$$

Em que  $Ms_i$  representa a massa superficial útil do elemento  $i$  ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ );  $S_i$  a área da superfície interior do elemento  $i$  ( $\text{m}^2$ ), e  $A_p$  a área útil de pavimento ( $\text{m}^2$ ).

Os elementos que contribuem para o armazenamento de calor são as paredes da envolvente, de compartimentação, pavimento e tecto, a sua massa térmica deve ser considerada de acordo com o anexo VII do RCCTE [2] segundo as condições apresentadas no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Massa térmica dos elementos ( $M_{si}$ )

Tipo de Elemento		sem isolamento
Paredes	Simplex	$m_t/2 \leq 150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$
	Separação de Fracções Autónomas	$m_t/2 \leq 150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$
	Interiores à Fracção Autónoma	$m_t/2 \leq 300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$
Pavimentos	Interiores à Fracção Autónoma	$m_t/2 \leq 300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$

Os valores das massas térmicas superficiais obtidas e os restantes parâmetros de cálculo estão disponíveis no anexo F.

Deste cálculo efectuado para a habitação e detalhado no anexo F, foi estimada uma massa térmica de  $475 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  que segundo o regulamento (RCCTE, Quadro VII.6) corresponde a uma inércia térmica de classe forte.

Quadro 3.4 - Classe da inércia térmica

Massa térmica útil	Classe de Inércia térmica
$475 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$	Forte

### 3.4. Caracterização Dimensional da Habitação Estudada

Para a realização dos ensaios experimentais foi utilizada a habitação do piso 2 do edifício, uma vez que se encontra entre duas fracções de habitação idênticas, sendo possível controlar as condições ambientes dos pisos adjacentes e também porque de forma geral, o estado de conservação da habitação é superior quando comparada com as restantes.

Foi realizado um levantamento dimensional onde se obtiveram resultados como a área de pavimento útil dos diversos compartimentos, vãos envidraçados e as áreas da envolvente opaca

em contacto com o exterior, edifícios adjacentes e caixa de escadas, os valores são apresentados no Quadro 3.5. A habitação possui um pé direito de 3,0 m e uma área útil de pavimento de 75,45 m<sup>2</sup>, dos quais se obtém um volume interior de 226,35 m<sup>3</sup>

Quadro 3.5 - Área útil de pavimento e envolvente exterior e interior

Área Útil de Pavimento		Área Envolvente Exterior e Interior		
Compartimento	Área útil (m <sup>2</sup> )	Designação	Orientação	Área da Envolvente (m <sup>2</sup> )
1	11,12	Envolvente	Noroeste	13,46
2	9,50	Opaca	Sudeste	16,56
3	12,53	Exterior	Saguão	4,76
4	10,51	Envolvente	Empenas	47,40
5	12,86	Opaca Interior	Caixa de Escadas	27,23
6	6,28	Vão Envidraçados	Noroeste	8,78
7	2,47		Sudeste	6,24
8	10,18		Saguão	2,15
Total =	75,45	-	-	126,58

A planta que representa os diferentes compartimentos da habitação é a apresentada na Figura 3.11, de referir que o compartimento 7 representa a casa de banho da habitação e o compartimento 8 representa a cozinha.

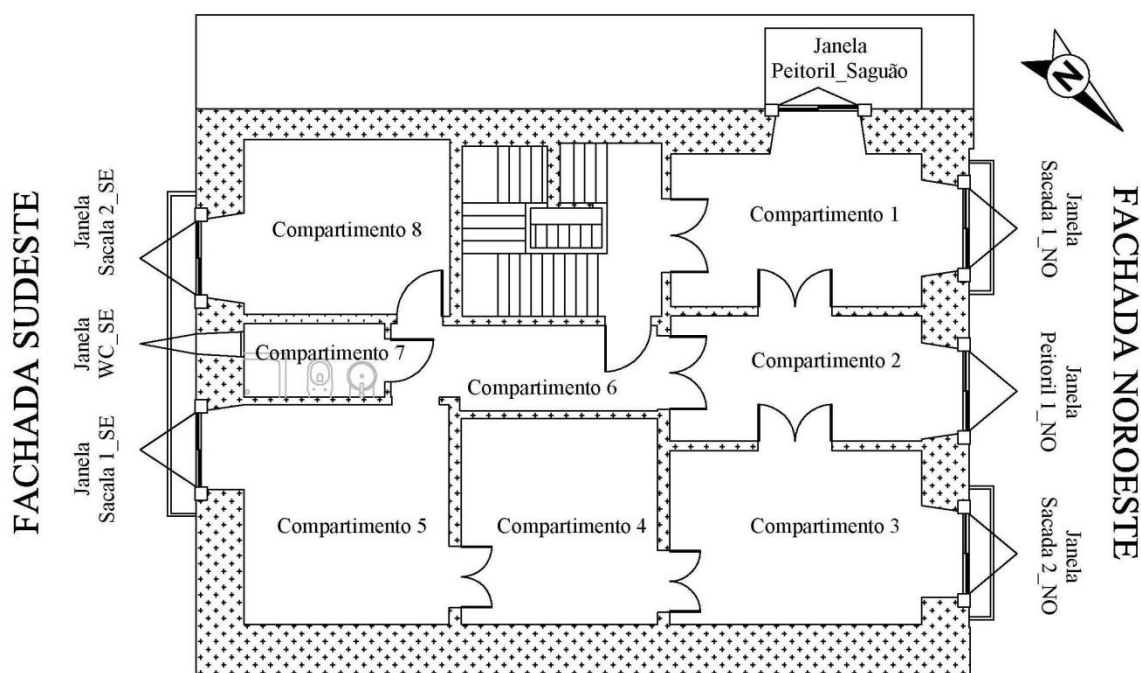


Figura 3.11 - Planta da habitação do piso 2 estudada

## 4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 4.1. Aspectos Gerais

Apresenta-se neste capítulo, a metodologia experimental referente aos ensaios realizados com o método do fluxímetro, para determinação das características térmicas da parede e do método do aquecimento para avaliar necessidades de aquecimento da habitação estudada.

No método do fluxímetro serão referidos os equipamentos principais necessários à realização da campanha experimental, para a medição de temperaturas superficiais e dos fluxos que atravessam as paredes. Serão também abordadas as condições em que foram realizados os ensaios ao nível das temperaturas, assim como as opções tomadas para a colocação dos equipamentos e a forma como é promovido o seu contacto à parede. Dada a flutuação das temperaturas no interior e exterior da habitação e os fenómenos de armazenamento de calor associados às paredes estudadas, serão abordadas as ferramentas de cálculo para tratamento de resultados obtidos nos ensaios experimentais, tendo em consideração os referidos fenómenos.

Para o método do aquecimento apresenta-se os equipamentos necessários à realização dos ensaios, para determinar a energia consumida para aquecimento, medição da radiação solar e monitorização das temperaturas no interior e exterior da habitação. No âmbito deste método experimental, serão referidas as condições de temperatura a que foi submetida a habitação e o posicionamento dos equipamentos durante o período de obtenção de dados. Neste ensaio será dispensado o tratamento de resultados, uma vez que os dados obtidos são referentes às leituras dos equipamentos, não sendo necessário proceder a qualquer tipo de correcção e/ou cálculos adicionais para determinar os consumos finais de energia e determinar a radiação solar incidente.

### 4.2. Determinação da Resistência Térmica das Paredes – Método do Fluxímetro

Com o objectivo de avaliar o  $U$  da envolvente opaca exterior da habitação, utilizou-se um método experimental que fosse de encontro ao pretendido, permitindo uma análise “*in situ*”. Nesse sentido foi utilizado o método do fluxímetro definido na norma ISO 9869:1994 [4], que permite avaliar o isolamento térmico das paredes através de um modelo de regime estacionário de transmissão de calor. Em condições ambientes normais, existem vários fenómenos relativos à flutuação da temperatura no exterior e no interior de uma habitação, promovendo a troca de calor entre o ambientes através dos elementos de separação. Nesse sentido e mediante o aquecimento da habitação, foram determinadas as propriedades térmicas das paredes através do referido método.

### 4.2.1. Equipamentos

De acordo com as especificações da norma, a aquisição de dados deve ser realizada de forma contínua ou em intervalos curtos ao longo do dia e sem interrupções significativas. Os principais equipamentos utilizados na realização dos ensaios são especificados na ISO 9869:1994 [4] e incluem fluxímetros e termopares, que permitem obter as variáveis necessárias ao cálculo das características térmicas das paredes analisadas.

#### a) Fluxímetros

Os fluxímetros são equipamentos utilizados para medições “*in situ*” do fluxo de calor que atravessa um elemento opaco, desde que seja promovido o contacto directo entre o equipamento e a face do elemento. Os equipamentos utilizados nos ensaios são compostos por um material cerâmico-plástico de cor preta, que permite baixar a sua resistência térmica permitindo captar todos os sinais provenientes do espaço onde estão inseridos. Os fluxímetros utilizados têm cerca de 80 mm de diâmetro e possuem 5 mm de espessura.

Quando estimulado, o fluxímetro emite um sinal eléctrico (mV) captado essencialmente pelo seu núcleo, a área de medição destes equipamentos situa-se na sua zona central constituída por sensores de elevada sensibilidade, capazes de captar toda a gama de fluxos que os atravessa. O fluxo de calor que o atravessa será equivalente ao que atravessa o elemento alvo de medição, considerando que não existem fugas laterais. A redução da secção de medição do equipamento deve-se essencialmente ao facto de na zona central as linhas de fluxo de calor possuírem uma orientação uniforme, enquanto que nas áreas periféricas existe a possibilidade de ocorrerem fugas de calor causando imprecisão aos resultados medidos.

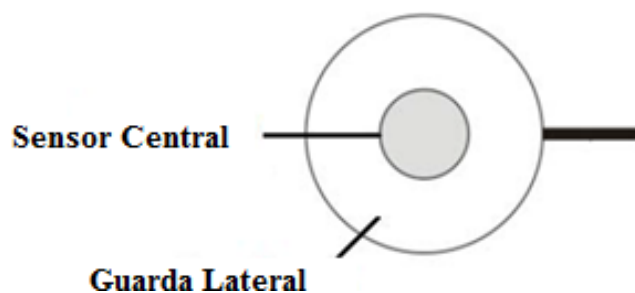


Figura 4.1 - Fluxímetro - Área de medição [48]

Por serem equipamentos de precisão que funcionam para várias gamas de impulsos, a qualidade dos resultados depende da calibração periódica dos equipamentos. A calibração dos fluxímetros utilizados neste ensaio, foi realizada pelo departamento de calibrações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), encontrando-se o relatório de calibração no anexo B. Nesse sentido, foi possível encontrar curvas de calibração para cada fluxímetro que converte os valores obtidos em mV pelo equipamento de armazenamento de dados, para  $W \cdot m^{-2}$ .

**b) Termopares**

Segundo a ISO 9869:1994 [4], para a determinação da resistência térmica da parede ( $R$ ), é necessária a determinação das temperaturas superficiais das faces dos elementos estudados, utilizando-se para o efeito termopares. Estes dispositivos são capazes de converter energia calorífica em energia eléctrica e consistem na ligação entre dois fios metálicos, formando um circuito fechado na extremidade em que um dos fios está em contacto com uma fonte de calor e a outra em contacto com a temperatura ambiente, essa diferença entre temperaturas gera uma diferença de potencial que origina uma força electromotriz de efeito Seebeck.

Existem diferentes tipos de termopares, em função do metal utilizado e do calibre dos fios, dependendo a escolha do intervalo de temperatura em causa e da resistência ao meio ambiente onde se insere [55]. Face aos parâmetros a determinar e condições de ensaio, optou-se para a realização do trabalho experimental termopares do tipo T (Figura 4.2), cujos metais são de cobre e constantan com a particularidade da junção entre metais estar exposta e ser soldado estanho de modo a promover a boa ligação dos metais.



Figura 4.2 – Representação dos termopares do tipo T [55]

As características gerais dos termopares tipo T utilizados no âmbito do ensaio experimental estão representadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Características dos termopares tipo T

Características dos Termopares				Limite de Erro ASTM E-230	
Tipo	Elemento (+)	Elemento (-)	Faixa de Temperatura	-200 a 0 °C	0 a 370 °C
T	Cobre	Constantan	-200 a 370 °C	+/- 1 °C ou 0,75%	+/- 1 °C ou 1,5%

**c) Datataker**

Para realizar as leituras e aquisição dos dados provenientes dos fluxímetros e termopares, foi utilizado um equipamento de aquisição contínua com capacidade de descodificar os sinais enviados pelos equipamentos e armazená-los numa memória interna. Nesse sentido, foi utilizado um aparelho *datataker* modelo DT85 série 2 (Figura 4.3). O equipamento possui uma memória interna que possibilita o funcionamento independente, com disponibilidade de armazenamento para cerca de 317.000 dados, que podem ser posteriormente exportados para *Excel*. O *datataker* disponibiliza para a aquisição de dados cerca de 16 canais analógicos, derivando de cada canal quatro terminais com capacidade para assegurar a ligação de 16, 32 ou 48 dispositivos.



Figura 4.3 - Equipamento de aquisição de dados – datataker

#### 4.2.2. Condições de Realização dos Ensaios

A campanha de ensaios para determinação das características térmicas das paredes da envolvente foi realizada no edifício “Gaioleiro” na habitação do piso 2, com uma duração de cerca de nove semanas e meia (7-05-2011 a 14-07-2011). Desta forma os ensaios incidiram sobre duas paredes da habitação, que pelas suas características e dimensões se consideraram representativas da totalidade da envolvente. Sabe-se também que ambas as paredes são constituídas pelos mesmos materiais ainda que aparentemente por proporções diferentes consoante a espessura, o que leva a uma uniformização da resistência térmica ( $R$ ), que será estimada com base nos resultados experimentais, para todos os elementos que apresentem espessuras idênticas.

As paredes objecto de estudos foram as de separação do interior da habitação com a zona do saguão, relativas ao compartimento 1 (ver Figura 3.11), já que neste local para além de apresentar melhores condições exteriores para a realização dos ensaios, dado não se registar incidências solares suficientes que possam alterar os valores medidos pelo fluxímetro, a envolvente opaca exterior é constituída por uma parede com 0,74 m de espessura, diminuindo para os 0,27 m de espessura na zona abaixo do peitoril da janela. Como o estudo envolve duas paredes distintas, a campanha de ensaios teve dois momentos de análise, o correspondente à parede 1 de maior espessura (0,74 m) que teve início no dia 7-05-2011 e terminou no dia 18-06-2011 inclusive e para a parede de menor espessura (0,27 m) os ensaios ocorreram entre 30-06-2011 e 14-07-2011 inclusive. A colocação dos equipamentos de registo aconteceu de forma faseada determinada pelo período de ensaio das respectivas paredes.

Nos ensaios das diferentes paredes, os fluxímetros foram colocados a meia altura do paramento interior da parede a analisar segundo o objectivo do ensaio, representando a totalidade do elemento construtivo. Adicionalmente, foi colocado um fluxímetro no paramento exterior em cada uma das situações, de forma a compreender qual o comportamento do fluxo no interior da parede e com isso avaliar o armazenamento de calor subjacente a cada parede. Na colocação do fluxímetro no paramento interior, procurou-se em ambas as paredes que o local escolhido fosse fora da influência de pontes térmicas lineares, fendas e de singularidades patológicas. Do lado exterior garantiu-se a protecção do fluxímetro à queda de chuva, vento e radiação solar directa.

Para garantir o contacto entre os equipamentos e as faces da parede, foi utilizada uma camada fina de pasta colocada directamente nos fluxímetros e posteriormente fixos à parede. No paramento interior, a aderência foi reforçada com a utilização de fita adesiva colocada nos extremos do equipamento (Figura 4.4 a) tendo a preocupação de não alterar as propriedades de condutibilidade do mesmo e não interferir com o núcleo central de medição. No paramento exterior, uma vez que a superfície é mais irregular devido ao destacamento do reboco recorreu-se a suportes de cortiça prensada (Figura 4.4 b), ficando assim garantido para ambos os casos o contacto entre os fluxímetros e o elemento construtivo durante todo o tempo de ensaio, nas zonas interior e exterior.



Figura 4.4 - Montagem dos fluxímetros parede 1: a) Paramento interior; b) Paramento exterior

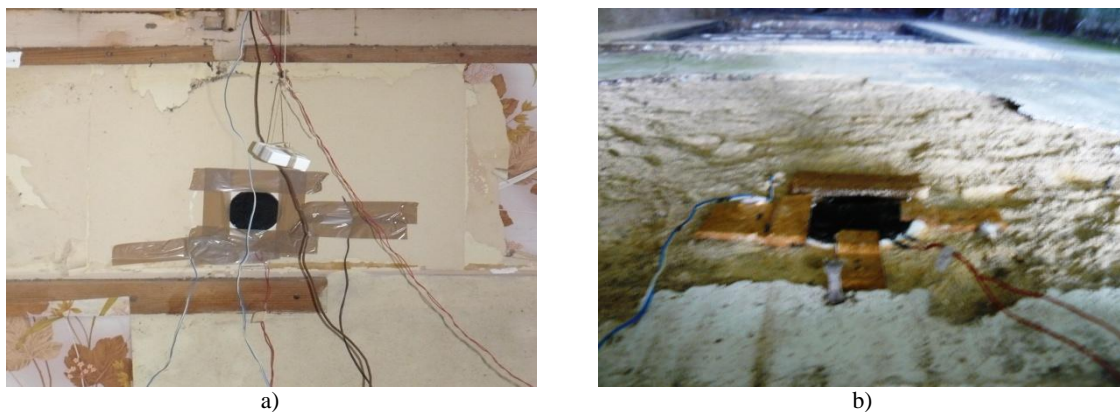


Figura 4.5 - Montagem dos fluxímetros parede 2: a) Paramento interior; b) Paramento exterior

Para o registo das temperaturas superficiais das paredes foram utilizados termopares, os equipamentos foram colocados para a análise da parede 1 (0,74 m) no paramento interior que correspondem aos números 14, 15, 16 e 17 e para o paramento exterior 18, 19, 20 e 21, criando uma malha em redor do fluxímetro registando a informação da temperatura em vários pontos da parede. Para a parede 2 (0,27 m) foram utilizados no paramento interior os termopares 20 e 23 e no exterior os 19 e 22. As temperaturas superficiais consideradas para as paredes são relativas às médias das temperaturas registadas em cada termopar no respectivo paramento, sendo a disposição dos termopares e fluxímetros apresentados na Figura 4.6 para os paramentos interiores

e as respectivas cotas de montagem dos equipamentos de medição. Para o paramento exterior o processo foi em tudo semelhante, tendo o cuidado aquando da montagem dos equipamentos para que ficassem no alinhamento dos colocados no paramento interior. A organização da totalidade dos equipamentos nos elementos estudados e restante habitação, podem ser consultados no anexo A, desenho D2 (Parede 1) e desenho D3 (Parede 2).

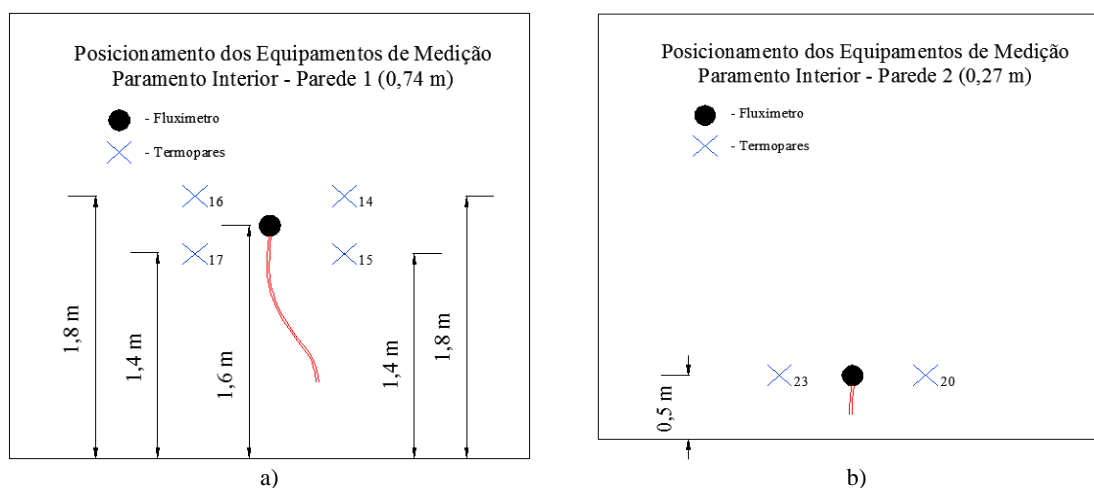


Figura 4.6 - Posicionamento dos equipamentos de medição: a) Parede 1 (0,74 m); b) Parede 2 (0,27 m)

Para a correcta leitura da temperatura nos paramentos, deve ser promovido o contacto directo entre o termopar e a superfície da parede, para o caso específico do ensaio foi utilizada fita adesiva e a colocação do equipamento na parede é conforme a Figura 4.7. De referir que para efeitos deste ensaio, o termopar 11 (relativo ao tecto) foi responsável pela determinação da temperatura ambiente numa zona central do compartimento 1 onde foi realizado o ensaio.



Figura 4.7 - Montagem do Termopar

No âmbito da campanha experimental realizada foram utilizados um total de 24 termopares, estando os restantes situados em paredes específicas da habitação com o objectivo de monitorizar as temperaturas superficiais nesses elementos, obtendo assim dados no decorrer do ensaio que serão utilizados em análises posteriores.

Depois de colocados os principais equipamentos, foram ligados ao *datataker* nos diversos canais analógicos disponíveis e realizado um programa de aquisição de dados. Nesse programa foi tido em conta a obrigatoriedade de intervalos de medição curtos e de leituras realizadas sempre de

forma contínua, sem interrupções de largos períodos no tempo. O equipamento foi então programado para fazer leituras de minuto a minuto, fazendo médias a cada dez minutos das respectivas leituras sendo esse o valor registado e considerado.

Para a realização dos ensaios, procedeu-se ao aquecimento da habitação de modo a promover uma diferença de temperatura suficiente entre o ambiente interior e o exterior de modo a dar-se o fenómeno de transferência de calor pelos elementos opacos, originando a passagem de um fluxo de calor do interior para o exterior. Devido ao estado de degradação dos elementos horizontais, pavimento e tecto, era importante minimizar as perdas de calor para as habitações dos pisos 1 e 3 e para evitar essa ocorrência, procedeu-se igualmente ao seu aquecimento com o intuito de aproximar as temperaturas entre pisos. Uma vez que os ensaios tiveram início e fim num período posterior à estação de Inverno, as habitações foram aquecidas a temperaturas próximas dos 30 °C. Desse modo, foram utilizados dois aquecedores eléctricos por piso com uma potência combinada de 3 kW. De referir que o aquecimento da habitação teve início no dia 18-05-2011 e terminou no dia 12-07-2011. Foram também adicionados aos ensaios, sensores de temperatura e humidade como forma de controlar as condições às quais se estava a sujeitar o edifício. Os aparelhos foram colocados nas zonas de maior relevância para os ensaios, no exterior da habitação na fachada Noroeste e saguão, na zona interior na fachada Noroeste e Sudeste e nos pisos 1 e 3 e finalmente na caixa de escadas e edifícios adjacentes. Estes equipamentos dizem igualmente respeito ao método do aquecimento dada a simultaneidade dos ensaios, pelo que no subcapítulo 4.3 serão objecto de descrição mais pormenorizada.

#### 4.2.3. Tratamento de Resultados - Método Médio de Cálculo

Para determinar as características térmicas da parede em regime permanente de condução de calor, como a resistência térmica (4.1) e a condutibilidade térmica equivalente (4.2) das paredes do edifício “Gaioleiro”, foi utilizado o método do fluxímetro de acordo com a ISO 9869:1994.

$$R = \frac{T_{sij} - T_{sej}}{q_j} \quad 4.1$$

$$\lambda_{eq} = \frac{e}{R} \quad 4.2$$

Em que  $R$  representa a resistência térmica da parede ( $\text{m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{W}^{-1}$ );  $T_{sij}$  a temperatura superficial interior  $j$  (°C);  $T_{sej}$  a temperatura superficial exterior  $j$  (°C);  $\lambda_{eq}$  a condutibilidade térmica equivalente ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ), e  $e$  a espessura da parede (m).

Contudo, o regime estacionário em condições reais de exposição ao ambiente exterior em geral nunca é alcançado devido à flutuação existente das temperaturas, sendo por isso necessária a aplicação de um método que tivesse em conta esse aspecto. Foi então utilizado o método médio

de cálculo, que considera que o processo de transmissão de calor não atinge um regime estacionário, tendo em conta a variação ao longo do tempo do fluxo de calor bem como das temperaturas superficiais associados às paredes.

O índice  $j$  representa o número de medições individuais realizadas pelos equipamentos, sendo então possível estimar o valor da resistência térmica ( $R$ ) dado pela equação (4.3):

$$R_j = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad 4.3$$

Para a correcta determinação dos resultados, deve ser garantido um conjunto de condições associados aos elementos a medir, as paredes a ensaiar não devem estar sujeitas a qualquer tipo de radiação, uma vez que ao promover o aquecimento da superfície exterior da parede, pode causar a alteração do sentido do fluxo. O mesmo é válido para os equipamentos de registo, que devem estar protegidos da radiação solar e das intempéries, quando montados no exterior, por serem equipamentos que reagem a uma variada gama de impulsos.

Para elementos pesados cujo calor específico por unidade de área é superior a  $20 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , como é o caso das paredes estudadas, a análise deve ser realizada durante um período que seja um número múltiplo de 24 horas e deverá apenas ser concluído se cumpridos os seguintes pressupostos:

- I. a duração do teste deve ser superior a 72 horas (3 dias);
- II. o valor de resistência térmica ( $R$ ) obtido no final dos ensaios não deve desviar mais de 5% do valor obtido nas 24 horas anteriores, e
- III. o valor de ( $R$ ) obtido pela análise de dados recolhidos durante o primeiro período de ensaio  $INT \left( 2 \cdot \frac{Dt}{3} \right)$  dias, não deve desviar mais de +/- 5% dos valores obtidos no ultimo período de tempo com a mesma duração  $INT \left( 2 \cdot \frac{Dt}{3} \right)$ .  $Dt$  é a duração do teste em dias, e  $INT$  é a parte inteira do número.

Quando as condições acima referidas são cumpridas, considera-se que estão reunidas todas as condições de paragem e os resultados obtidos para a resistência térmica da parede devem ser considerados como válidos.

#### **4.2.4. Tratamento de Resultados - Efeito do Armazenamento Térmico**

O efeito do armazenamento térmico está directamente relacionado com a inércia térmica dos elementos a medir. Esta propriedade resulta da capacidade dos materiais constituintes de um elemento, reterem o calor proveniente de uma fonte exterior na eventualidade de acontecerem variações de temperatura significativas.

A equação (4.3) depende apenas do fluxo de calor ao longo do tempo que é lido pelos fluxímetros na parede, não considerando qualquer correcção devido ao armazenamento térmico. Desta forma o fluxo medido constitui um valor aproximado, dado que não entra em consideração com o calor retido na parede. Na norma [4] estão referidos os procedimentos de cálculo a adoptar na correcção dos valores do fluxo de calor devido ao factor de armazenamento térmico envolvendo:

- cálculo dos factores de correcção de massa térmica interiores e exteriores ( $F_i$  e  $F_e$ ) para o elemento em estudo, e
- ajustamento, envolvendo os factores de correcção ao valor medido para o fluxo de calor ( $q_i$ ).

Os factores de correcção de massa térmica são obtidos dividindo a estrutura em  $N$  camadas verticais numeradas de 1 até  $N$ , onde a camada inicial corresponde à superfície interior ou exterior dependendo do sentido da divisão. Para cada divisão deve ser calculado o valor teórico das resistências térmicas utilizando a equação (4.4) e também o valor da sua capacidade térmica, correspondente à capacidade térmica de cada material que constitui a parede, equação (4.5).

$$R_k = \frac{e}{\lambda_{eq}} \quad 4.4$$

$$C_k = C_p \cdot \rho \cdot e \quad 4.5$$

Em que  $C_p$  representa o calor específico ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ );  $\rho$ , a densidade dos materiais ( $kg \cdot m^{-3}$ ),  $e$ , a espessura da camada  $k$  (m). A metodologia de cálculo que se segue é relativa à determinação dos factores de massa térmica, como especificado na norma [4]. Para a camada interior ( $J = K = 1$ ),  $R_{ik} = 0$ , para as camadas exteriores ( $J = K = N$ ),  $R_{ek} = 0$ .

$$R_{ik} = \sum_{j=1}^{k-1} R_j \quad 4.6 \quad R_{ek} = \sum_{j=k+1}^N R_j \quad 4.7$$

$$F_{ek} = C_k \cdot \left[ \frac{R_k}{R} \cdot \left( \frac{1}{6} + \frac{R_{ik} + R_{ek}}{3R} \right) + \frac{R_{ik} \cdot R_{ek}}{R^2} \right] \quad \Rightarrow \quad F_e = \sum_{k=1}^N F_{ek} \quad 4.8$$

$$F_{ik} = C_k \cdot \left[ \frac{R_{ek}}{R} + \frac{R_k^2}{3R^2} - \frac{R_{ik} \cdot R_{ek}}{R^2} \right] \quad \Rightarrow \quad F_i = \sum_{k=1}^N F_{ik} \quad 4.9$$

Em que  $F_i$  e  $F_e$  são os factores de massa térmica interiores e exteriores ( $J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ );  $C_k$  a capacidade térmica da camada  $k$  ( $J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ), e  $R$  a resistência térmica teórica do elemento ( $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ).

Depois de calculados os factores de massa térmica exterior e interior, estão reunidas as condições para efectuar a correcção do fluxo de calor ( $q$ ) medido pelo fluxímetro. De notar que qualquer

correção a ser realizada deve incidir sobre um período superior a 24 horas. Assim, o somatório dos fluxos de calor para a equação (4.3) deve ser corrigido da seguinte forma:

$$\sum q_j - \frac{(F_i \cdot \delta T_i + F_e \cdot \delta T_e)}{\Delta T} \quad 4.10$$

Em que  $\Delta t$  corresponde ao tempo entre leituras (s), e  $\delta T_i$  e  $\delta T_e$  correspondem à diferença entre a média das temperaturas interiores e exteriores respectivamente durante as 24 horas do dia em questão e as 24 horas anteriores (°C). A partir da equação (4.10), o fluxo de calor medido ( $q_j$ ) pelo fluxímetro passa a fluxo de calor corrigido ( $q_j'$ ) possibilitando assim o ajustamento do cálculo da resistência térmica ( $R$ ).

### **4.3. Avaliação Experimental das Necessidades de Aquecimento – Método do Aquecimento**

Para avaliar experimentalmente as necessidades de energia necessária para o aquecimento da habitação estudada, foi adoptado o método do aquecimento tendo por base o método “Net Energy Input Method” referido na secção 2.4.1, adaptado ao âmbito deste trabalho e às condições em que se encontra o edifício.

O método do aquecimento permite de uma forma simples, estimar a energia que é necessária disponibilizar à habitação para que se mantenha a determinada temperatura, através da medição dos gastos de energia dos equipamentos de aquecimento e ainda contabilizar os ganhos através dos envidraçados relativos à radiação solar incidente. A energia que é dispendida para o período de ensaio designado, constitui as necessidades nominais efectivas de energia eléctrica necessária para manter a habitação a uma temperatura constante ao longo do tempo.

#### **4.3.1. Equipamentos**

O método do aquecimento tem por base a medição dos consumos de energia consumida para o aquecimento da habitação e a medição dos ganhos solares associados aos envidraçados na fracção. Os principais equipamentos utilizados no âmbito deste ensaio serão apresentados nos pontos que se seguem.

##### **a) Aquecedores e Sensor de Temperatura**

Para aquecer a habitação foi utilizado um aquecedor eléctrico com uma potência de 2,3 kW (Figura 4.8 a) e um termo-ventilador com 2,0 kW (Figura 4.8 b), estes equipamentos possuem reguladores de potência possibilitando o ajustamento da temperatura e do consumo energético consoante a necessidade.

A monitorização das temperaturas foi realizada a partir de *data loggers* com sensores de temperatura e humidade da marca HOBO série U10 (Figura 4.8 c). Os equipamentos são de aquisição contínua e têm autonomia de 1 ano de bateria e a sua memória interna é proporcional ao intervalo de tempo entre medições, a gama de temperaturas medidas pelos equipamentos varia entre de -20 a 70 °C e a precisão é de +/- 3,5%. Os *loggers* foram testados no sentido de aferir o seu grau de precisão e os resultados obtidos estão disponíveis no anexo B.

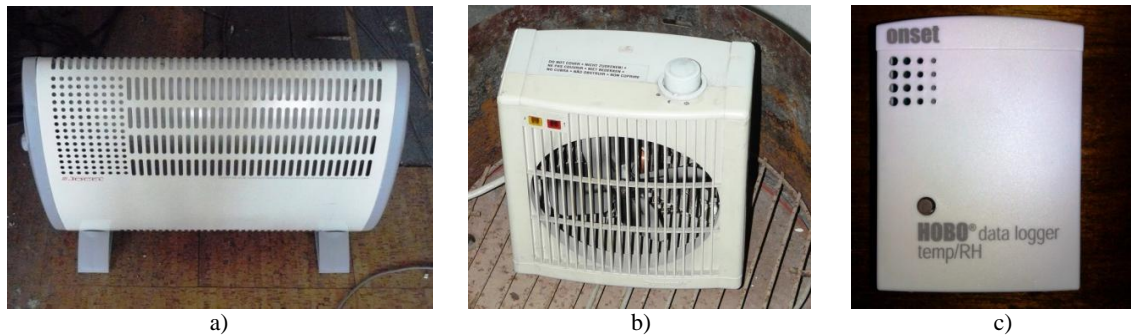


Figura 4.8 - Equipamentos de temperatura: a) Aquecedor; b) Termo-ventilador; c) Sensor de temperatura

#### b) Medidor de Energia e Termóstato

O registo da energia consumida pelos equipamentos de aquecimento foi realizado na fonte de alimentação, através de um equipamento de medição de energia (Energy Logger 4000) ao longo do período de ensaio (Figura 4.9 a). O *logger* possui uma memória interna e realiza leituras de minuto a minuto da energia consumida e a sua potência máxima de funcionamento é de 3,0 kW.

Com o objectivo da manutenção da temperatura constante durante o período de ensaio, foi utilizado um termóstato (Figura 4.9 b). Este equipamento é ligado ao medidor de consumos e faz a ligação aos aquecedores, permitindo o corte de corrente assim que a temperatura ambiente ultrapasse o valor estabelecido no equipamento.



Figura 4.9 - Equipamentos de energia: a) Medidor de Consumo; b) Termóstato

c) **Piranómetro**

No método experimental adoptado, torna-se também necessário determinar os ganhos de calor associados à habitação. Uma vez que o edifício encontra-se desabitado, a única fonte de calor mensurável é a proveniente da radiação solar que incide nos vãos envidraçados e resultam em ganhos de calor para a habitação. Nesse sentido, impunha-se determinar a radiação incidente e para isso foi utilizado um piranómetro (Figura 4.10). O equipamento foi ligado ao *datataker*, descrito em secções anteriores (secção 4.2.1), onde a aquisição de dados é realizada de forma contínua.



Figura 4.10 – Equipamento de medição da radiação solar - Piranómetro

**4.3.2. Condições para a Realização dos Ensaios**

Os ensaios foram realizados entre os dias 20-05-2011 a 12-07-2011, em simultâneo com os ensaios para determinação das características térmicas da parede através do método do fluxímetro detalhado no subcapítulo 4.2. Como já foi anteriormente referido, os ensaios aconteceram entre os meses de Maio e Julho onde as temperaturas médias são superiores às estabelecidas no Inverno, foi então necessário aquecer a habitação a uma temperatura onde ocorressem perdas contínuas de calor para o exterior, os pisos adjacentes foram igualmente aquecidos devido às razões já evidenciadas (secção 4.2.2). Nesse sentido a habitação foi aquecida até aos 30 °C, o termóstato foi configurado para limitar as temperaturas e quando se dava uma subida para além do definido, a corrente eléctrica é interrompida desligando os aquecedores, até estabilização da mesma.

Para promover o aquecimento uniforme, os aquecedores foram colocados no compartimento 6 e 2 da habitação (ver Figura 3.11), direccionados para as diferentes fachadas a Noroeste e Sudeste. O termóstato foi colocado entre o compartimento 3 e 4 com o objectivo de permanecer num ponto intermédio da habitação e ao mesmo tempo num compartimento distinto dos aquecedores, de modo a que a sua leitura não fosse afectada pela massa de ar quente na envolvente dos mesmos. O registo da energia eléctrica consumida foi realizado de minuto a minuto, no sentido de aferir todas as variações de consumo existentes ao longo do período de ensaio.

Na Figura 4.11 apresentam-se os equipamentos de aquecimento, o termóstato e o medidor de consumo durante o período de ensaio.

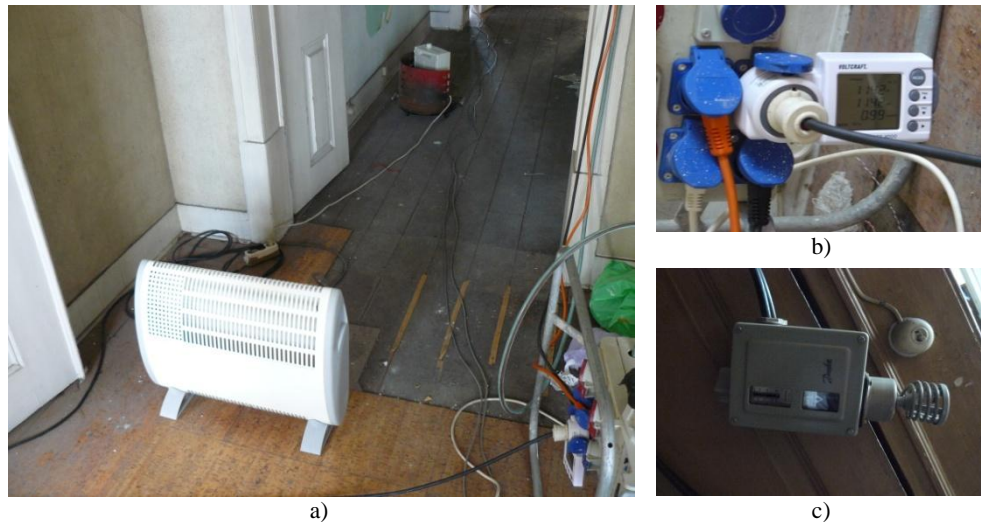


Figura 4.11 – Método do aquecimento: a) Disposição dos aquecedores; b) Medidor de consumo; c) Termóstato

As necessidades térmicas de aquecimento foram determinadas pelas trocas de calor da envolvente vertical da habitação estudada, dado o aquecimento das habitações do piso 1 e 3 anulando assim as trocas de calor entre pisos. A temperatura do ar foi medida com recurso a sensores de temperatura com intervalos de 10 minutos nos seguintes locais: no interior do piso 2, a Noroeste e Sudeste; na caixa de escadas; no interior do piso 1 e do piso 3, no edifício adjacente, e no exterior da habitação (saguão). A medição das temperaturas nos espaços adjacentes não climatizados como a caixa de escadas e o edifício adjacente, destinam-se a determinar os coeficientes de redução de perdas  $\tau$  que devido à alteração da temperatura ambiente interior da habitação face ao disposto no RCCTE [2], possuem no âmbito deste ensaio, um valor diferente dos convencionais especificados neste regulamento. Para a realização de leituras de temperatura a uma cota intermédia da habitação, os equipamentos foram colocados suspensos a meia altura entre o tecto e o pavimento (Figura 4.12 b).

Relativamente aos ganhos subjacentes à habitação, no decurso do ensaio foram medidos os ganhos solares através de uma janela a Sudeste, tendo sido colocado o piranómetro na face interior do envidraçado (Figura 4.12 a), contabilizando desta forma a radiação solar incidente, o efeito do factor solar e das obstruções associadas aos edifícios adjacentes. A partir desta medição, determinou-se a influência dos ganhos solares pelos envidraçados no processo de aquecimento da habitação e também das paredes da fachada a Sudeste, sendo esta última situação analisada posteriormente.

A disposição da totalidade dos equipamentos na habitação pode ser consultada em planta no anexo A, desenho D4.



a)



b)

Figura 4.12 – Método do aquecimento: a) Piranómetro; b) Sensor de temperatura

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1. Aspectos Gerais

Nos subcapítulos 5.2 e 5.3, apresentam-se os resultados relativos aos ensaios experimentais para determinação da resistência térmica da parede 1 (0,74 m) e da parede 2 (0,27 m) respectivamente. Serão apresentados os fluxos medidos nos paramentos interiores e exteriores das paredes, assim como as temperaturas superficiais e ambientes. No tratamento de dados realizou-se a correção dos fluxos interiores medidos devido ao armazenamento de calor nas paredes, devido à espessura das mesmas. Será também calculada a resistência térmica ( $R$ ) dos elementos recorrendo ao método médio de cálculo e estimada uma condutibilidade térmica equivalente ( $\lambda_{eq.}$ ). No âmbito dos referidos subcapítulos, foi verificado o critério de paragem subjacente aos ensaios para cada parede e o seu cumprimento com o estabelecido na norma [4].

Atendendo à espessura e à especificidade das paredes estudadas, foi desenvolvido um modelo de condução de calor em regime dinâmico (subcapítulo 5.4). Neste modelo foi avaliada a condução de calor através das paredes e determinadas as suas resistências térmicas superficiais para as condições de ensaio. Os resultados finais serão analisados e comparadas as temperaturas superficiais medidas e as obtidas através do modelo de cálculo. Será igualmente verificado através do modelo desenvolvido, o tempo necessário para que seja atingido um regime de “quase estacionaridade” de transmissão de calor nas paredes 1 e 2 desde o início do seu aquecimento.

No subcapítulo 5.5, apresentam-se os resultados relativos à campanha experimental realizada para determinar as necessidades energéticas da habitação, as temperaturas, a energia consumida e os ganhos solares através dos envidraçados ao longo do período de ensaio.

### 5.2. Determinação da Resistência Térmica da Parede 1 (0,74 m) – Método do Fluxímetro

#### 5.2.1. Resultados Experimentais

Na presente secção serão apresentados os resultados dos fluxos de calor medidos pelos fluxímetros, as temperaturas superficiais da parede 1 e as temperaturas ambientes. Os valores utilizados para os cálculos, constituem médias diárias de leituras realizadas a cada 10 minutos dos parâmetros referidos. Os resultados obtidos estão representados através do gráfico da Figura 5.1. O período de análise da parede 1 teve início no dia 07-05-2011 e fim em 18-06-2011, ou seja, 43 dias de ensaio. A temperatura superficial medida nos pontos em torno do fluxímetro (ver secção

4.2.2) é semelhante, evidenciando que a heterogeneidade da parede deve ter um impacto reduzido na medição do fluxo de calor no paramento interior.

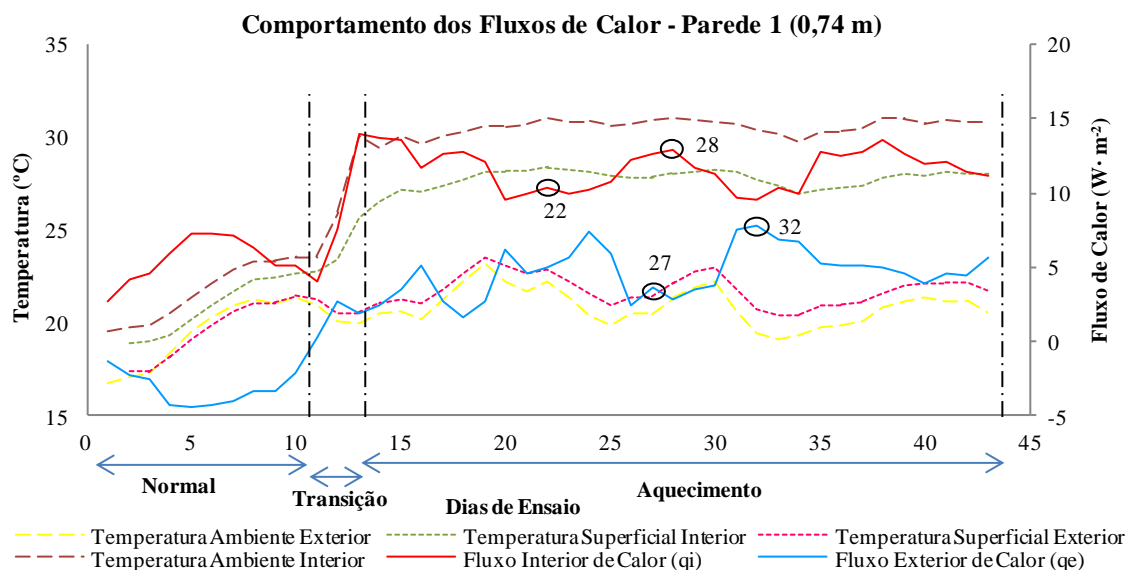


Figura 5.1 - Gráfico do comportamento dos fluxos de calor - parede 1 (0,74 m)

De acordo com os dados do gráfico, existem dois momentos distintos de análise que correspondem ao período sem alteração das condições ambientais e após essas alterações com o respectivo período de transição incluído. Numa primeira fase até ao dia 11 inclusive, as temperaturas médias do ambiente exterior são inferiores às do ambiente interior da habitação em média 2 °C, esta situação não proporciona a transferência de calor do interior para o exterior de forma contínua pela parede, uma vez que ambos os paramentos têm capacidade para absorver calor dos ambientes (interior e exterior) como é possível verificar pelo gráfico apresentado. Este estado foi chamado de “normal”, uma vez que a habitação estava em regime livre no que diz respeito às temperaturas (07-05-2011 a 17-05-2011, inclusive).

Os aquecedores foram ligados (18-05-2011) e a habitação passou por um período que se designou como de “transição”, com a duração de 2 dias (dias 12 e 13 do ensaio) onde se registou a subida das temperaturas interiores, quer do ambiente quer da superfície da parede. No que diz respeito ao ambiente exterior, é de salientar o facto da temperatura na superfície da parede ter aumentado após o dia 14, mantendo-se superior à temperatura ambiente exterior, resultado do aquecimento da parede realizado pelo interior. É também evidente a alteração do fluxo interior que em termos médios, aumenta para quase o dobro.

O período de ensaio de 20-05-2011 a 18-06-2011 (inclusive) corresponde ao período de aquecimento ao qual se aplicou o método do fluxímetro, uma vez que estava garantida a transferência de calor entre o ambiente interior e o exterior devido às diferenças de temperatura existentes (Figura 5.2). Quando analisado este período que decorre entre os dias 14 e 43 do ensaio, denota-se uma estabilização da temperatura interior que em média foi de 30,7 °C, obtida

especificamente no compartimento 1 onde foram realizados os ensaios. A temperatura superficial no paramento interior da parede mantém-se sempre abaixo da temperatura do ambiente, resultado da resistência térmica superficial que é exercida pela parede. Foi considerada a temperatura exterior a medida no saguão, uma vez que nesta zona não existe qualquer tipo de incidência solar directa, assim sendo, a temperatura exterior apresenta um valor médio de 21,6 °C.

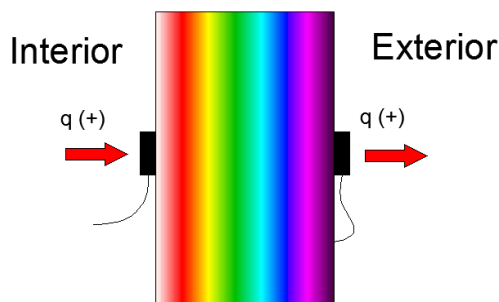


Figura 5.2 - Sentido do fluxo de calor medido pelos fluxímetros

Quando se dá a estabilização das temperaturas, o calor vai aquecer a superfície da parede que por sua vez vai aquecendo a camada que lhe é adjacente e assim sucessivamente até ser libertado pelo paramento exterior com conservação de energia. No caso concreto da parede em análise, é possível verificar através do gráfico a existência de defasamentos entre um pico de fluxo medido no interior (calor que dá entrada na parede) e o pico de fluxo com um desenvolvimento semelhante que passa pelo fluxímetro situado no exterior. Os pontos assinalados no gráfico traduzem os dias em que os diversos picos são medidos, pode observar-se que no caso do pico mais baixo (22-27), o calor percorre toda a espessura da parede durante aproximadamente 5 dias e no outro pico analisado, (28-32) a duração é de 4 dias. A inércia térmica da parede e a sua forte capacidade de retenção de calor contribuem para a ocorrência deste fenómeno de uma forma sistemática ao longo do ensaio.

No que diz respeito aos valores medidos no paramento interior e exterior do fluxo de calor, era expectável que a quantidade de calor que entra na parede fosse a mesma que sai, na perspectiva de que o fluxo se dá perpendicularmente ao elemento percorrendo-o de uma forma unidireccional. Pela análise do gráfico tal facto não se verifica, tomando como exemplo o pico assinalado correspondente ao dia 22, a leitura no interior possui um  $q_{il} = 10,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  e o pico correspondente no dia 27 lido pelo exterior é de  $q_{el} = 3,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , correspondendo a uma diferença de  $6,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  existindo uma clara dissipação de energia ao longo da parede. Este fenómeno pode ser explicado pela heterogeneidade da parede ao nível da disposição dos materiais que a constituem, podendo em diversos locais existir concentrações de material de maior capacidade em reter o calor. Partindo do princípio que o fluxo de calor toma sempre o trajecto onde existe menor resistência térmica dos elementos, pode estar comprometida a direccionalidade do mesmo e o fluxo percorrer diversos caminhos ao longo da parede e a sua saída dar-se num outro ponto não medido.

## 5.2.2. Tratamento dos Resultados

### 5.2.2.1. Correção do Fluxo - Efeito de Armazenamento Térmico

A correção devido ao efeito de armazenamento térmico da parede constitui uma forma prática de corrigir os valores do fluxo de calor medido que atravessa as paredes. O calor armazenado nos materiais leva a erros na determinação do fluxo real da parede, que devem ser corrigidos de acordo com a ISO 9869 [4] e como demonstrado na secção 4.2.4.

Atendendo às suas características, a parede 1 possui inércia térmica elevada devido à grande espessura e por isso possui maior potencial de armazenamento de calor ao longo das diferentes camadas. Como foi referido no subcapítulo 3.3 referente à caracterização do edifício, as paredes são constituídas essencialmente por pedras de calcário macio, tijolo cerâmico e por argamassa de cal e areia. Neste trabalho experimental optou-se por ignorar valores pré-concebidos para as paredes estudadas e procedeu-se ao cálculo teórico das suas características térmicas necessárias ao cálculo da correção do fluxo de calor medido no paramento interior. Para a parede 1 (0,74 m), considerou-se a seguinte constituição percentual ao longo da espessura, 50% pedra de calcário, 20% tijolo cerâmico e 30% argamassa de cal e areia. Estas percentagens já têm em conta as camadas de reboco de argamassa de cal e areia. Através da norma EN 12524 [53] e do ITE50 [52], foi possível para os referidos materiais determinar a sua condutibilidade térmica equivalente e resistência térmica havendo depois lugar à sua ponderação através das percentagens adoptadas, como é possível verificar no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Características térmicas teóricas da parede 1 (0,74 m de espessura)

	e	$\lambda_{eq.}$	R	Composição		R Parede	$\lambda_{eq.}$ Parede
<b>Calcário Macio</b>	0,74	1,10	0,67	50%	0,34	0,77	0,96
<b>Tijolo Cerâmico</b>	0,74	0,92	0,80	20%	0,16		
<b>Arg. Cal e Areia</b>	0,74	0,80	0,93	30%	0,28		

Para efeitos de cálculo do efeito de armazenamento de calor na parede, é necessário determinar alguns parâmetros característicos como o calor específico e a densidade do material, especificados no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 - Características gerais da parede 1 estudada

Características	Materiais		Parede 1	Unid.
<b>Condutibilidade Térmica Equivalente (<math>\lambda_{eq.}</math>)</b>			0,96	(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
<b>Calor Específico (<math>C_p</math>)</b>	<b>Argamassa</b>	1.000	968	(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
	<b>Calcário</b>	1.000		
	<b>Tijolo Cerâmico</b>	840		
<b>Densidade do Material (<math>\rho</math>)</b>	<b>Argamassa</b>	1.600	1.800	(kg·m <sup>-3</sup> )
	<b>Calcário</b>	1.800		
	<b>Tijolo Cerâmico</b>	2.100		
<b>Espessura (e)</b>			0,74	(m)

De acordo com o método utilizado para o cálculo do fluxo corrigido, devem ser determinados os factores de massa térmica exterior  $F_e$  (equação 4.8) e interior  $F_i$  (equação 4.9) para cada parede de acordo com as características já determinadas. Para a realização da referida correcção, optou-se por dividir a parede em 8 camadas  $k$  com igual espessura.

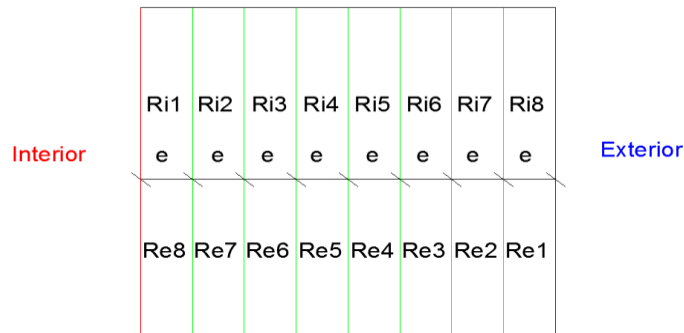


Figura 5.3 - Processo de divisão da parede

A Figura 5.3 configura a divisão realizada na parede 1 em que o  $R_i$  é relativo à sua resistência nas diferentes camadas desde o paramento interior até ao exterior, aumentando ao longo da sua espessura sendo que na superfície interior toma valor zero por imposição da norma, o mesmo se aplica à  $R_e$  mas em sentido contrário. Divididas as diferentes paredes em camadas, os resultados para a resistência térmica de cada uma ( $R_k$ ) bem como a capacidade térmica ( $C_k$ ) foram calculados a partir das equações (4.4) e (4.5), reunindo as condições para o cálculo dos factores de massa térmica onde se obtiveram para a parede 1:  $F_i = 429.792 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  e  $F_e = 214.896 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . A partir desta determinação, pode ser determinado o fluxo corrigido com a aplicação da equação (4.10) para a totalidade do período de ensaio. No anexo D, encontram-se todos os quadros referentes ao cálculo dos factores de massa térmica, temperaturas medidas, leituras dos fluxos e a correspondente correcção durante o ensaio.

Apresenta-se em seguida o gráfico relativo ao fluxo medido ( $q_i$ ) em média por dia e a respectiva correcção ( $q_i'$ ), por aplicação da correcção devido ao efeito de armazenamento térmico. De referir que nas primeiras 24 h de ensaio não se realiza qualquer acção de correcção.

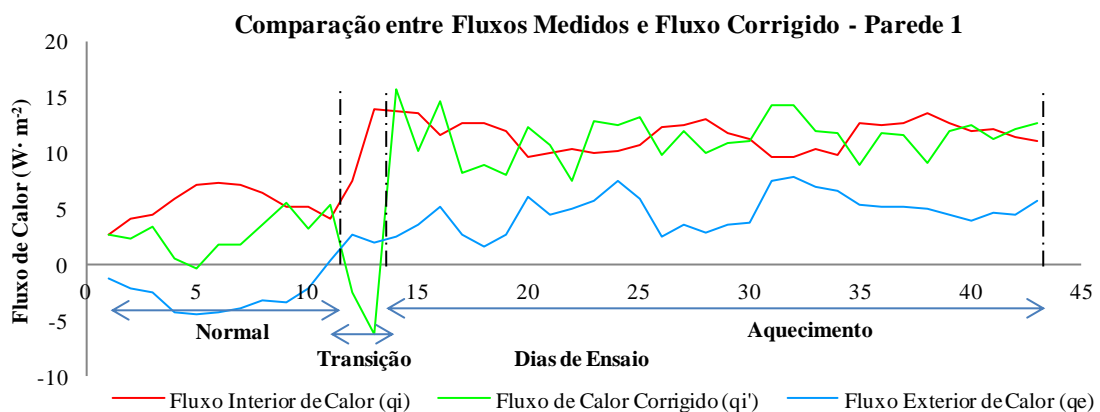


Figura 5.4 - Gráfico de comparação entre fluxo medido e fluxo corrigido – parede 1 (0,74 m)

A Figura 5.4 corresponde à correcção do fluxo de calor lido pelo fluxímetro interior no caso da parede 1 (0,74 m). O estudo do gráfico referente à Figura 5.1 revelou o efeito de armazenamento térmico através dos desfasamentos encontrados, contudo, após a correcção esse efeito foi substancialmente reduzido dando origem a uma nova curva de fluxo de calor ( $q_i'$ ). Verificando o comportamento da curva do fluxo interior corrigido e comparando-a com a curva relativa ao fluxo medido no exterior ( $q_e$ ), observa-se alguma complementaridade no desenvolvimento de ambas as curvas. A dissipação de energia após comparação entre o fluxo corrigido e do fluxo medido no paramento exterior, em média difere de  $6,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  por dia, relativo ao calor que é libertado eventualmente em pontos singulares da parede, o equivalente a 57% de calor captado pelo fluxímetro interior.

### 5.2.2.2. Aplicação do método Médio – Cálculo da Resistência Térmica (R)

Para o cálculo da resistência térmica (R) da parede 1, foi utilizado o método médio de cálculo cujos princípios foram já abordados na secção 4.2.3. O cálculo deve ser realizado de acordo com a equação (4.3), onde são utilizadas as temperaturas superficiais dos paramentos interiores e exteriores e o fluxo de calor interior (corrigido) que atravessa a parede. As variáveis de que depende o cálculo constituem valores médios diários.

Em seguida, serão demonstrados graficamente na Figura 5.5 os resultados obtidos para a resistência térmica da parede 1 durante todo o período de ensaio.

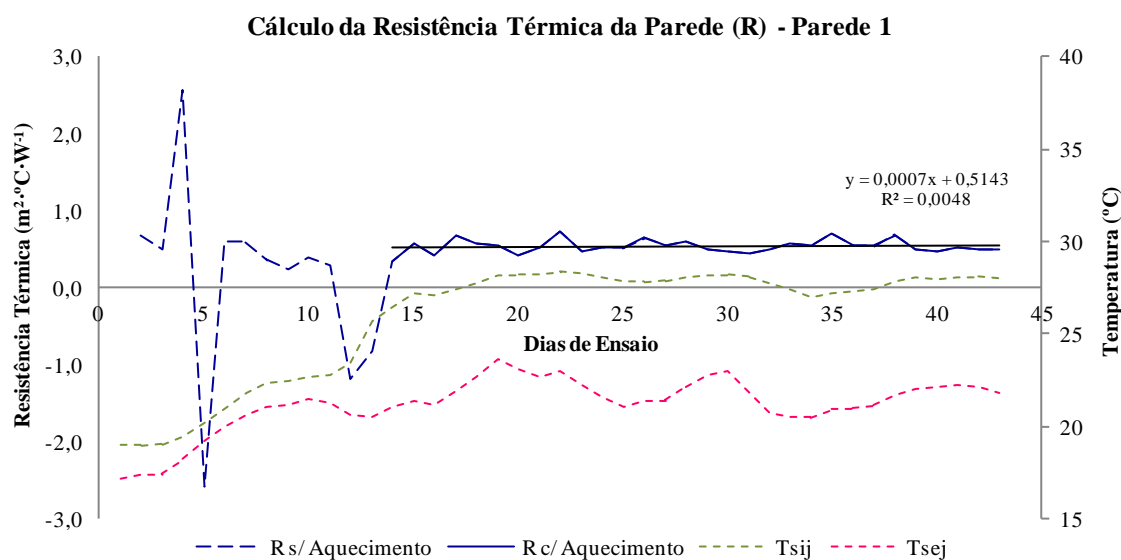


Figura 5.5 - Gráfico do cálculo da resistência térmica (R) - parede 1 (0,74 m)

Nos primeiros dias de ensaio relativos ao período “normal” sem alteração das condições do interior da habitação, o valor da resistência térmica (R) possui grandes variações e amplitudes que ultrapassam o  $5 \text{ m}^2\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ , o que evidencia a necessidade de provocar uma diferença de

temperatura significativa entre ambientes de modo a obter valores da resistência térmica mais estáveis e que de facto sejam representativos do real comportamento da parede.

Após o período inicial, existe um período transiente do aquecimento do ambiente interior e da parede, ocorrendo a partir do dia 20-05-2011 uma estabilização da temperatura superficial interior e consequentemente dos valores calculados para a resistência térmica da parede. Assim, os valores obtidos desde o início do ensaio correspondentes ao período sem aquecimento (até ao final do décimo terceiro dia) foram descartados, é no entanto de referir que estes valores detêm um claro interesse na medida em que exprimem a necessidade de impor um gradiente térmico suficiente capaz de estabilizar os valores de  $R$ .

A partir do décimo quarto dia, teve início um período de maior estabilização dos resultados que dura até ao final do ensaio, com variações no valor de  $R$  com mínimos de 0,3 e máximos de  $0,8 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ . Assim sendo, o valor médio da resistência térmica da parede é realizado para o período de aquecimento, e de acordo com a equação (4.2), foi calculada a condutibilidade térmica equivalente e apresentados os resultados no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 - Características térmicas - Parede 1

<b>Parede 1 (0,74 m)</b>	
Resistência Térmica ( $R$ )	Condutibilidade Térmica Equivalente ( $\lambda_{eq}$ )
$0,53 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$	$1,38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

O valor experimental obtido para a condutibilidade térmica equivalente da parede do “Gaioleiro”, pode ser comparado com o valor convencional estabelecido no ITE54 [5], para paredes da mesma época construtiva. Assim sendo, o valor obtido para a condutibilidade térmica equivalente é inferior em 20% para a parede 1 face ao valor convencional de  $1,76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ . Estes resultados traduzem uma majoração por parte dos valores convencionais de referência, tendo a parede analisada melhor comportamento face às perdas de calor.

### 5.2.2.3. Verificação do Critério de Paragem do Ensaio

Por imposição regulamentar, os ensaios só devem parar quando é cumprido um conjunto de requisitos impostos, de modo a conferir confiança aos resultados obtidos. Uma vez que a parede objecto de estudo possui um calor específico superior a  $20 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , os critérios de paragem estão definidos na secção 4.2.3 do presente trabalho e será realizado exclusivamente para o período de aquecimento em que foram considerados os resultados para o cálculo de  $R$ . Assim, os resultados que determinam a paragem dos ensaios para as paredes 1 (0,74 m) com a duração de 30 dias, são obtidos a partir da conjugação dos seguintes critérios:

- I. A duração do teste deve ser superior a 72 horas (3 dias):

Quadro 5.4 - Critério de paragem 1

<b>Critério de Paragem 1</b>	
<b>Parede 1</b>	<b>Aceitação</b>
720 h	> 72 h

- II. O valor de  $R$  obtido não se deve desviar mais de 5% do valor obtido nas 24 horas anteriores:

Quadro 5.5 - Critério de paragem 2

<b>Critério de Paragem 2</b>	
<b>Parede 1</b>	<b>Aceitação</b>
2,11%	< 5%

- III. O valor de  $R$  obtido pela análise de dados recolhidos durante o primeiro período de ensaio  $INT(2 \cdot \frac{Dt}{3})$  dias não se deve desviar mais de +/- 5% dos valores obtidos no último período de tempo com a mesma duração:

Quadro 5.6 - Critério de paragem 3

<b>Critério de Paragem 3</b>				
<b>Parede 1</b>	INT (2.Dt/3): 20	14 A -- 33 A	0,527	1,65%
		43 A -- 23 A	0,535	
<b>Aceitação</b>	< 5%			

Após a verificação dos diferentes critérios de paragem, conclui-se que os resultados obtidos para o ensaio realizado estão dentro dos limites estabelecidos pela norma [4] ao cumprir os três critérios definidos. As variações percentuais nos critérios de paragem 2 e 3 são de facto muito baixas, tendo sido alcançado resultados muito estáveis ao logo dos ensaios na parede 1 atribuindo confiança aos resultados obtidos.

### 5.3. Determinação da Resistência Térmica da Parede 2 (0,27 m) – Método do Fluxímetro

#### 5.3.1. Resultados Experimentais

O ensaio para a parede 2 (0,27 m) teve início no dia 30-06-2011 e fim no dia 14-07-2011, passando por três fases de temperatura à semelhança da parede 1. A primeira fase é relativa à de “aquecimento”, com a duração de 13 dias, a temperatura média registada ao longo deste período no compartimento 1 foi igualmente 30,7 °C. Os equipamentos de aquecimento foram desligados no final do dia 12 em que se deu 1 dia para o período de “transição” (13-07-2011) e outro para o período “normal” (14-07-2011). O ensaio foi realizado no seguimento do relativo à parede 1, em que foram mantidas as condições de temperatura interior. O intervalo entre o fim do ensaio da parede 1 e o início do ensaio na parede 2 (18-06-2011 a 30-06-2011), deveu-se ao facto de ter

vido realizada a mudança dos equipamentos e como tal houve um período de adaptação do equipamento à parede até se dar o início à recolha de dados.

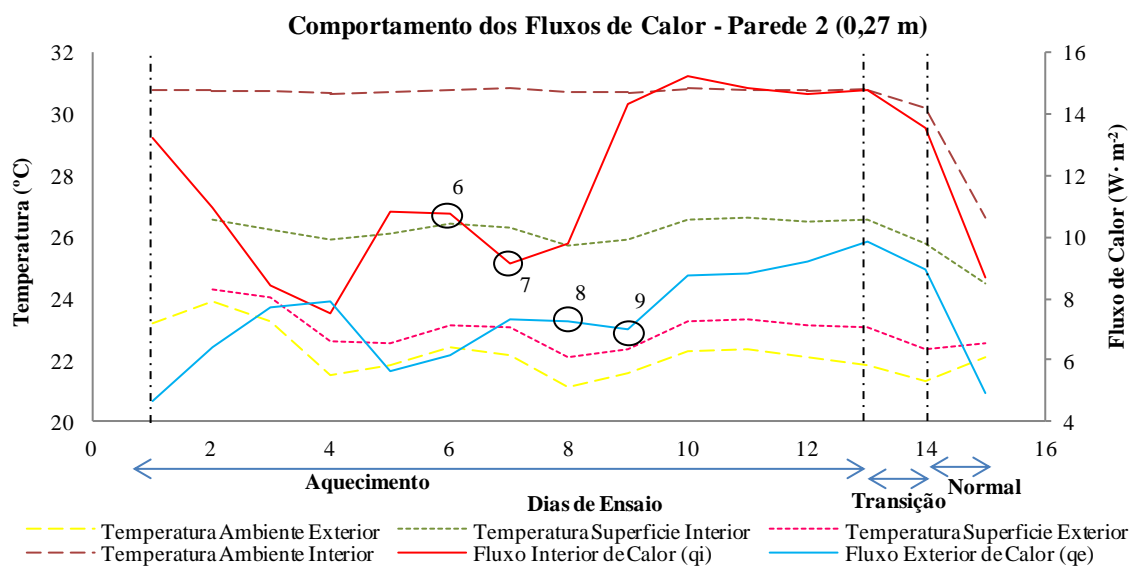


Figura 5.6 – Gráfico do comportamento dos fluxos de calor - parede 2 (0,27 m)

Ao analisar o gráfico da Figura 5.6, verifica-se desde logo uma diferença significativa entre a temperatura interior e a temperatura superficial do paramento interior da parede. Este fenómeno pode ter sido causado pela resistência térmica que se faz sentir na parede, ou pela maior permeabilidade da parede às variações da temperatura exterior. Verifica-se também uma variação significativa do fluxo medido no interior, entre o dia 8 e 9, estabilizando a partir do dia 10, este efeito pode dever-se à intervenção realizada “*in situ*” com a selagem completa da janela de peitoril, uma vez que a mesma apresentava sinais graves de deterioração com algumas aberturas significativas devido ao empenamento do vão.

Devido à menor espessura da parede 2, e conseqüente redução da capacidade de armazenamento de calor, o intervalo de tempo em que se dá o desfasamento do fluxo de calor é consideravelmente inferior quando comparado com a parede 1, verificando-se um período de apenas dois dias entre o pico de fluxo lido pelo fluxímetro interior até que seja captado pelo fluxímetro no paramento exterior. Este efeito pode ser observado nos pontos do gráfico que representam os dias entre registo de picos, correspondentes aos picos do dia 6 e 8 e de 7 e 9, para as diferentes leituras dos fluxímetros.

A partir da observação do gráfico pode-se observar ainda que a partir do dia 14 de ensaio, dia em a habitação já se encontra em regime livre, os valores da temperatura interior tendem a descer bem como os valores dos fluxos interior e exterior.

### 5.3.2. Tratamento dos Resultados

#### 5.3.2.1. Correção do Fluxo - Efeito de Armazenamento Térmico

Para a parede 2 (0,27 m) foi igualmente considerado o efeito de armazenamento térmico, este efeito não será eventualmente tão relevante quando comparado com a parede 1, no entanto, foi também aplicada a correção para eliminar possíveis focos de erro. O tratamento de dados relativos à correção do efeito de armazenamento térmico foi realizado num processo semelhante à parede 1.

No âmbito da parede 2 e resultado da inspeção “*in situ*” da parede, foi realizado um ajuste nas percentagens de materiais constituintes, uma vez que se verificou uma menor concentração de material “pesado” em detrimento da maior percentagem de argamassa de cal e areia, quando comparada com a parede 1. Assim sendo, procedeu-se a um ajuste nas seguintes proporções, 40% de pedra calcária, 20% para o material cerâmico e de 40% para a argamassa de cal e areia. Os resultados das características térmicas teóricas são os apresentados no Quadro 5.7.

Quadro 5.7 - Características térmicas teóricas da parede 2 (0,27 m de espessura)

	e	$\lambda_{eq.}$	R	Composição		R Parede	$\lambda_{eq.}$ Parede
Calcário Macio	0,27	1,10	0,25	40%	0,1	0,29	0,93
Tijolo Cerâmico	0,27	0,92	0,29	20%	0,06		
Arg. Cal e Areia	0,27	0,80	0,34	40%	0,14		

Para efeitos de cálculo do efeito de armazenamento de calor na parede é necessário determinar alguns parâmetros característicos como o calor específico e a densidade do material, especificados no Quadro 5.8.

Quadro 5.8 - Características gerais da parede 2 estudada

Características	Materiais		Parede 2	Unid.
Condutibilidade Térmica Equivalente ( $\lambda_{eq.}$ )			0,93	(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
Calor Específico (C <sub>p</sub> )	Argamassa	1.000	968	(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
	Calcário	1.000		
	Tijolo Cerâmico	840		
Densidade do Material ( $\rho$ )	Argamassa	1.600	1.760	(kg·m <sup>-3</sup> )
	Calcário	1.800		
	Tijolo Cerâmico	2.100		
Espessura (e)			0,27	(m)

A parede 2 foi dividida em 8 camadas  $k$  de igual espessura (Figura 5.3), sendo os pressupostos admitidos para a parede 1 iguais na avaliação da parede 2. Nesse sentido e depois de dividida a parede, os resultados para a resistência térmica de cada camada ( $R_k$ ) bem como a sua capacidade térmica ( $C_k$ ) foram calculados a partir das equações (4.4) e (4.5), reunindo as condições para o cálculo dos factores de massa térmica:  $F_i = 153.33 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  e  $F_e = 76.67 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . A partir deste

cálculo complementar, pode ser determinado o fluxo corrigido com a aplicação da equação (4.10). Como já foi anteriormente referido, no anexo D encontram-se todos os quadros referentes ao cálculo dos factores de massa térmica, das temperaturas medidas, das leituras dos fluxos e a correspondente correcção durante o ensaio.

Em seguida apresenta-se na Figura 5.7, o fluxo medido ( $q_i$ ) em média por dia, e a respectiva correcção ( $q_i'$ ) por aplicação da correcção devido ao efeito de armazenamento térmico.

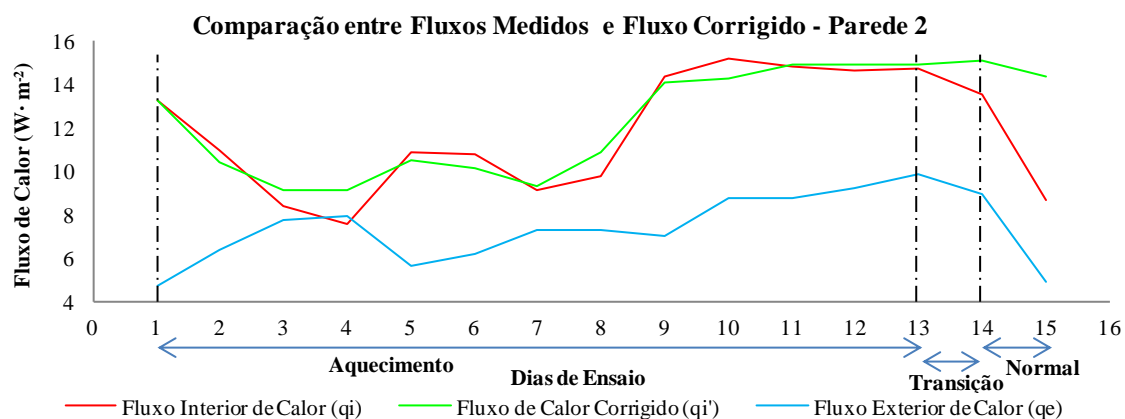


Figura 5.7 - Gráfico de comparação entre fluxos medidos e fluxo corrigido – parede 2 (0,27 m)

Como era expectável, o efeito do armazenamento de calor na parede é algo reduzido e isso traduz-se numa curva de fluxo corrigido praticamente com o mesmo desenvolvimento da curva inicial com os valores do fluxo medidos no paramento interior.

Os valores medidos para o fluxo do paramento interior são superiores ao paramento exterior, as causas apontadas anteriormente fazem igualmente sentido neste caso específico. O valor em média de dissipação diária ronda os  $3,64 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , o que corresponde a uma diferença de 32% entre o fluxo corrigido que entra e o que sai da parede, para os pontos específicos onde estão situados os fluxímetros.

### 5.3.2.2. Aplicação do método Médio – Cálculo da Resistência Térmica ( $R$ )

Para o cálculo da resistência térmica ( $R$ ) da parede 2, foi igualmente utilizado o método médio de cálculo cujos princípios foram já abordados no capítulo 4.2.3. O cálculo do valor de  $R$  deve ser realizado de acordo com a equação (4.3), onde são utilizadas as temperaturas superficiais dos paramentos interiores e exteriores e o fluxo de calor (corrigido) que atravessa a parede.

Em seguida apresenta-se na Figura 5.8, o gráfico relativo à resistência térmica da parede característica da parede 2, durante o período de ensaio.

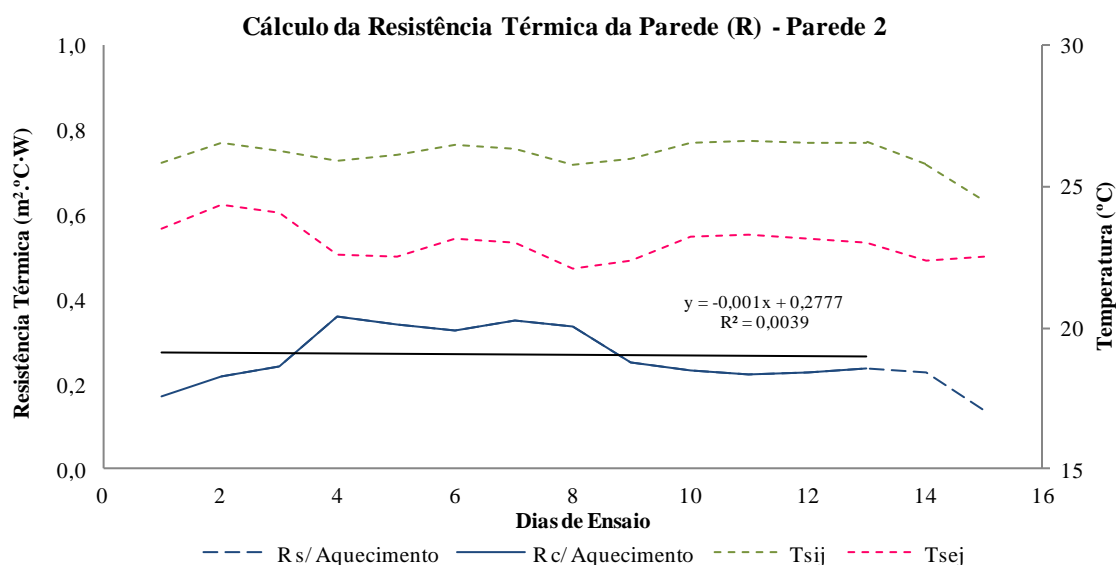


Figura 5.8 - Gráfico do cálculo da resistência térmica (R) - parede 2 (0,27m)

Uma vez que a habitação já se encontrava aquecida quando tiveram início os ensaios, os valores obtidos encontravam-se estáveis desde o primeiro dia até ao décimo segundo dia inclusive, os valores mínimos e máximos são de 0,2 e 0,4 ( $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ ) respectivamente. A partir do dia 13 os aquecedores foram desligados sendo possível verificar esse acontecimento no desenvolvimento da curva de  $R$  (recta a tracejado na Figura 5.8).

No âmbito do estudo da parede 2, devem ser tomadas algumas considerações relativas ao período a considerar para o cálculo do valor médio de  $R$ . Uma vez que houve alterações das condições a partir do dia 10 de ensaio, aquando da intervenção sobre a janela de peitoril (completa selagem de espaços de ar), optou-se por considerar o valor para a resistência térmica da parede 2 a média referente aos últimos 4 dias de ensaio no período de aquecimento. Os resultados obtidos para a resistência térmica e condutibilidade térmica equivalente da parede 2 estão representados no Quadro 5.9.

Quadro 5.9 - Características térmicas - Parede 2

<b>Parede 2 (0,27 m)</b>	
Resistência Térmica (R)	Condutibilidade Térmica Equivalente ( $\lambda_{\text{eq}}$ )
0,23 $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$	1,17 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Os resultados obtidos podem também ser alvo de comparação com os valores convencionais do ITE54 [5]. Assim sendo, a condutibilidade térmica obtida é cerca de 30% inferior face ao valor convencional de  $1,76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , traduzindo-se numa majoração por parte dos valores convencionais ao real comportamento da parede.

### 5.3.2.3. Verificação do Critério de Paragem do Ensaio

As condições de paragem dos ensaios já foram abordadas com detalhe na análise à parede 1, pelo que nesta subsecção, apresentam-se os resultados obtidos no âmbito do ensaio para a parede 2 em conformidade com as condições referidas na secção 4.2.3. Sendo o calor específico da parede 2 superior a  $20 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , os critérios que determinam a paragem do ensaio experimental são representados no Quadro 5.10.

Quadro 5.10 - Critérios de paragem do ensaio - Parede 2

Parede 2				Acceitação
Critério 1	96 h			> 72 h
Critério 2	2,78%			< 5%
Critério 3	INT (2.Dt/3):	10 A -- 11 A	0,228	1,92%
	2	12 A -- 13 A	0,232	

Os resultados obtidos no âmbito do ensaio experimental, revelam que depois de 4 dias os resultados apresentam-se bastante consistentes e cumprem os critérios estabelecidos na norma [4].

## 5.4. Transmissão de Calor na Parede em Regime Dinâmico

### 5.4.1. Desenvolvimento e Implementação do Método

Grande parte das paredes que constituem a habitação estudada apresentam uma espessura muito elevada, onde estão associados fenómenos de inércia térmica e resistências térmicas superficiais, face às condições impostas no ambiente interior. Atendendo ao facto da retenção de calor verificada nas paredes 1 e 2, foi desenvolvido um modelo de condução de calor em regime dinâmico, de modo a avaliar o comportamento das várias camadas de parede em função da temperatura a que são sujeitas e a sua permeabilidade à variação das mesmas. Neste modelo pretende-se também avaliar o tempo associado à obtenção de um regime “quase estacionário” de transmissão de calor.

O modelo foi desenvolvido segundo os princípios de condução de calor em regime dinâmico, abordado na secção 2.3.1 através de um método de diferenças finitas. Conforme proposto por Incropera e De Witt [42], os métodos de resolução para o tipo de equação como a referida em (2.3), podem ser de carácter explícito ou implícito. No presente trabalho foi utilizado o método implícito por melhor se adaptar às condições de ensaio existentes e limitar a convergência a um determinado intervalo de tempo que será a duração dos ensaios “*in situ*”.

A forma implícita de uma equação de diferenças finitas pode ser obtida mediante a equação (2.5), de modo a aproximar a derivada em função do tempo, ao avaliar todas as outras temperaturas correspondentes ao novo momento ( $p+1$ ). A equação (2.5) é então considerada para fornecer a aproximação, em função da derivada do tempo, das diferenças entre leituras anteriores. Assim,

para a forma implícita da equação de diferenças finitas para os nós interiores no sistema bi-dimensional e assumindo que o regime é realizado numa direcção, a temperatura dos nós é dada por:

$$(1 + 4Fo) \cdot T_{m,n}^{p+1} - Fo \cdot (T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1}) = T_{m,n}^p \quad 5.1$$

Da equação (5.1), é possível verificar que as novas temperaturas do nó (m, n) dependem das novas temperaturas dos “nós” que lhes são adjacentes que, em geral, são desconhecidas. No sentido de determinar as temperaturas desconhecidas nos “nós” em  $(t+\Delta t)$ , as equações nodais correspondentes devem ser resolvidas simultaneamente utilizando uma matriz inversa. O processo de cálculo envolve a resolução simultânea das equações nodais a cada momento, até que seja atingido o tempo final estabelecido.

A forma implícita da equação de diferenças finitas para o caso de uma parede como a representada na Figura 5.9, é dado pelo método do balanço energético.

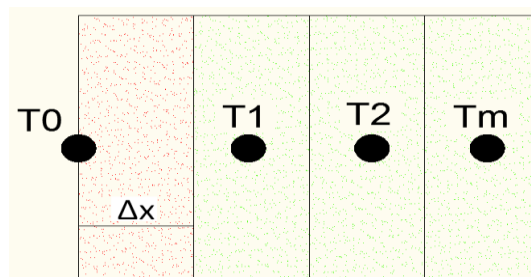


Figura 5.9 - Condução uni-dimensional do fluxo de calor

Para as superfícies interiores e exteriores da parede, correspondentes ao ponto  $T_0$  e  $T_m$ , o cálculo é realizado mediante a seguinte expressão de fronteira:

$$(1 + 2Fo + 2Fo \cdot Bi) \cdot T_0^{p+1} - 2FoT_1^{p+1} = 2Fo \cdot Bi \cdot T_\infty + T_0^p \quad 5.2$$

Quando se procede à determinação dos pontos das camadas interiores da parede ( $T_1, T_2, \dots, T_{m-1}$ ), a expressão de cálculo é dada por:

$$(1 + 2Fo) \cdot T_m^{p+1} - Fo \cdot (T_{m-1}^{p+1} + T_{m+1}^{p+1}) = T_m^p \quad 5.3$$

O coeficiente  $Fo$  é a forma das diferenças finitas no número de *Fourier* e dado por (5.4):

$$Fo = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad 5.4$$

Em que  $\alpha$  representa a difusibilidade térmica ( $m^2 \cdot s^{-1}$ );  $\Delta t$  o tempo entre leituras da temperatura (s), e  $\Delta x$  a espessura de cada camada que divide a parede (m).

O coeficiente  $Bi$ , representa o número de *Biot* (adimensional) e pode ser calculado efectuando um balanço térmico superficial onde:

$$\frac{k \cdot A}{L} \cdot (T_{s,1} - T_{s,2}) = h \cdot A \cdot (T_{s,2} - T_{\infty}) \tag{5.5}$$

$$\frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{T_{s,2} - T_{\infty}} = \frac{L/kA}{1/hA} = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{h \cdot L}{k} \equiv Bi \tag{5.6}$$

Em que  $k$  representa a condutibilidade térmica equivalente do elemento ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ );  $L$  a largura de cada camada (m), e  $h$  as resistências térmicas superficiais interior e exterior conforme o paramento ( $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ ). Como já foi anteriormente referido, a resolução das equações (5.2) e (5.3) será mediante a utilização de um produto matricial, recorrendo à matriz inversa cujas linhas e colunas são correspondentes ao número de camadas em que é dividida a parede, o produto matricial é assim composto por,  $[A]^{-1} \cdot [T] = [C]$ , sendo representado na Figura 5.10 o *display* elucidativo do cálculo realizado utilizando o software excel.

A matriz  $[A]$  é definida por:

$$\begin{bmatrix} (1 + 2Fo + 2Fo \cdot Bi) & -2Fo & 0 \\ -Fo & (1 + 2Fo) & -Fo \\ 0 & -2Fo & (1 + 2Fo + 2Fo \cdot Bi) \end{bmatrix}$$

A matriz coluna  $[T]$  é definida por:

$$\begin{bmatrix} 2Fo \cdot Bi \cdot T_{\infty} + T_0^p \\ T_m^p \\ 2Fo \cdot Bi \cdot T_{\infty} + T_{m+1}^p \end{bmatrix}$$

Como resultado do cálculo matricial para os períodos de tempo estabelecidos, obtêm-se as temperaturas na superfície exterior e interior da parede, bem como nos nós correspondentes às diferentes camadas. Este processo permitirá a comparação entre os valores calculados para as temperaturas superficiais e os valores medidos contribuindo para aferir a qualidade do modelo de transmissão térmica e dos pressupostos a ele associados.

Instance	e (m)	Ar ext	0	0,05	0,09	0,14	0,19	0,23	0,28	0,32	0,37	0,42	0,46	0,51	0,56	0,60	0,65	0,69	0,74	Ar int	
1	0,00E+00	16,0	21,5	22,4	22,9	23,4	23,8	24,2	24,7	25,0	25,4	25,8	26,2	26,6	27,0	27,4	27,8	28,5	25,2	0	
0		1,61E-05	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	19
1		2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	18,9
2		0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	21,5
3		0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	22,9
4		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	23,4
5		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	23,8
6		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	24,2
7		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	24,7
8		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	25,0
9		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	25,4
10		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	25,8
11		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	26,2
12		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	26,6
13		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	27,0
14		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	27,4
15		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	0,0E+00	27,8
16		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,2E-01	1,41E-01	2,2E-01	0,0E+00	28,5

	Matriz Inversa																			Tr-1	
0	8,4E-01	2,0E-01	3,2E-02	5,0E-03	7,9E-04	1,9E-04	2,0E-05	3,1E-06	6,0E-07	7,8E-08	1,2E-08	2,0E-09	3,1E-10	4,9E-11	7,7E-12	1,2E-12	1,9E-13				17,13
1	1,0E-01	7,4E-01	1,0E-01	1,0E-02	2,9E-03	4,6E-04	7,7E-05	1,2E-05	1,8E-06	2,9E-07	4,6E-08	7,2E-09	1,1E-09	1,8E-10	2,9E-11	4,6E-12	6,7E-13				20,83
2	1,6E-02	1,2E-01	7,3E-01	1,1E-01	1,8E-02	2,9E-03	4,9E-04	7,2E-05	1,1E-05	1,8E-06	2,8E-07	4,5E-08	7,1E-09	1,1E-09	1,8E-10	2,8E-11	4,2E-12				22,24
3	2,5E-03	1,9E-02	1,1E-01	7,3E-01	1,1E-01	1,8E-02	2,9E-03	4,9E-04	7,2E-05	1,1E-05	1,8E-06	2,8E-07	4,5E-08	7,1E-09	1,1E-09	1,8E-10	2,8E-11				22,91
4	4,9E-04	2,9E-03	1,8E-02	1,1E-01	7,3E-01	1,1E-01	1,8E-02	2,9E-03	4,9E-04	7,2E-05	1,1E-05	1,8E-06	2,8E-07	4,5E-08	7,1E-09	1,1E-09	1,8E-10				23,60
5	6,3E-05	4,6E-04	2,9E-03	1,8E-02	1,1E-01	7,3E-01	1,1E-01	1,8E-02	2,9E-03	4,9E-04	7,2E-05	1,1E-05	1,8E-06	2,8E-07	4,5E-08	7,1E-09	1,1E-09				23,83
6	9,3E-06	7,2E-05	4,9E-04	2,9E-03	1,8E-02	1,1E-01	7,3E-01	1,1E-01	1,8E-02	2,9E-03	4,9E-04	7,2E-05	1,1E-05	1,8E-06	2,8E-07	4,5E-08	7,1E-09				24,25
7	1,6E-06	1,2E-05	7,2E-05	4,9E-04	2,9E-03	1,8E-02	1,1E-01	7,3E-01	1,1E-01	1,8E-02	2,9E-03	4,9E-04	7,2E-05	1,1E-05	1,8E-06	2,8E-07	4,5E-08				24,65
8	2,5E-07	1,8E-06	1,1E-05	7,2E-05	4,9E-04	2,9E-03	1,8E-02	1,1E-01	7,3E-01	1,1E-01	1,8E-02	2,9E-03	4,9E-04	7,2E-05	1,1E-05	1,8E-06	2,8E-07				25,05
9	3,9E-08	2,9E-07	1,8E-06	1,1E-05	7,2E-05	4,9E-04	2,9E-03	1,8E-02	1,1E-01	7,3E-01	1,1E-01	1,8E-02	2,9E-03	4,9E-04	7,2E-05	1,1E-05	1,8E-06				25,45
10	6,1E-09	4,6E-08	2,9E-07	1,8E-06	1,1E-05	7,2E-05	4,9E-04	2,9E-03	1,8E-02	1,1E-01	7,3E-01	1,1E-01	1,8E-02	2,9E-03	4,9E-04	7,2E-05	1,1E-05				25,85
11	9,0E-10	7,2E-09	4,9E-08	2,9E-07	1,8E-06	1,1E-05	7,2E-05	4,9E-04	2,9E-03	1,8E-02	1,1E-01	7,3E-01	1,1E-01	1,8E-02	2,9E-03	4,9E-04	7,2E-05				26,24
12	1,3E-10	1,8E-09	7,1E-09	4,9E-08	2,9E-07	1,8E-06	1,1E-05	7,2E-05	4,9E-04	2,9E-03	1,8E-02	1,1E-01	7,3E-01	1,1E-01	1,8E-02	2,9E-03	4,9E-04				26,64
13	2,4E-11	1,8E-10	1,8E-09	7,1E-09	4,9E-08	2,9E-07	1,8E-06	1,1E-05	7,2E-05	4,9E-04	2,9E-03	1,8E-02	1,1E-01	7,3E-01	1,1E-01	1,8E-02	2,9E-03				27,01
14	3,9E-12	2,9E-11	1,8E-10	1,8E-09	7,1E-09	4,9E-08	2,9E-07	1,8E-06	1,1E-05	7,2E-05	4,9E-04	2,9E-03	1,8E-02	1,1E-01	7,3E-01	1,1E-01	1,8E-02				27,29
15	6,2E-13	4,6E-12	2,9E-11	1,8E-10	1,8E-09	7,1E-09	4,9E-08	2,9E-07	1,8E-06	1,1E-05	7,2E-05	4,9E-04	2,9E-03	1,8E-02	1,1E-01	7,3E-01	1,1E-01				27,44
16	1,0E-13	1,6E-12	3,9E-12	2,9E-11	1,8E-10	1,8E-09	7,1E-09	4,9E-08	2,9E-07	1,8E-06	1,1E-05	7,2E-05	4,9E-04	2,9E-03	1,8E-02	1,1E-01	7,3E-01				28,25

Figura 5.10 - Cálculo do produto matricial utilizando o *software Excel*

### 5.4.2. Cálculo das Resistências Térmicas Superficiais

Na medida em que o método implícito das diferenças finitas é afectado pela resistência térmica superficial das paredes, considerou-se fundamental tratar esta matéria com algum cuidado, uma vez que as condições a que foram sujeitas diferem do que é usual ser considerado nos valores de referência. Estes valores para as resistências superficiais interiores e exteriores são de 0,13 e 0,04  $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$  respectivamente, sendo conservativos, são válidos para temperaturas e condições de referência, conforme o especificado na norma ISO 6946:2007 [56].

A temperatura interior em média situa-se nos 30,7  $^\circ\text{C}$ , no exterior é de 21,6  $^\circ\text{C}$  e as condições ambientais no paramento exterior são relativas ao saguão, a incidência dos ventos nesse local é consideravelmente inferior ao de uma fachada tipo. Face a estes factos, os valores das resistências superficiais de ensaio devem ser calculados de acordo com o regulamento e são dadas por:

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad 5.7$$

Em que  $R_s$  representa a resistência superficial ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ );  $h_c$  e  $h_r$  a condutância térmica superficial de convecção e radiação respectivamente ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

Para o cálculo da resistência térmica superficial exterior ( $R_{se}$ ), foi utilizada a metodologia de cálculo referente à ISO 6946 [56], com base na equação (5.7). A determinação da resistência térmica superficial interior ( $R_{si}$ ) envolve uma abordagem mais cuidadosa, resultado das condições a que se submeteu a habitação e devido à complexidade das variáveis envolvidas.

#### a) Cálculo do Coeficiente de Convecção Exterior ( $h_{ce}$ )

Nesta situação, a condutância térmica superficial de convecção exterior ( $h_{ce}$ ) é dada por:

$$h_{ce} = 4 + 4 \cdot v \quad 5.8$$

Onde  $v$  corresponde à velocidade do vento em ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) que para efeitos do ensaio e das condições do saguão, foi considerado um  $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e conseqüentemente  $h_{ce} = 8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ .

#### b) Cálculo do Coeficiente de Radiação Exterior ( $h_{re}$ )

No que diz respeito ao cálculo do coeficiente de radiação exterior ( $h_{re}$ ) o valor é dado por:

$$h_{re} = \varepsilon \cdot h_{r0} \quad 5.9$$

$$h_{r0} = 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3 \quad 5.10$$

Em que,  $\varepsilon$  representa a emissividade da superfície que em geral assume o valor de 0,9;  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann [ $5,67 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ], e  $T_m$  a temperatura superficial do elemento medido (K).

Deste modo, a resistência térmica superficial exterior terá ao longo do cálculo um valor variável correspondente a cada 10 minutos, uma vez que depende da temperatura superficial da parede no paramento exterior. O valor de  $R_{se}$  para as diferentes paredes (1 e 2) varia entre os 0,07 e os 0,08  $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ , sendo este último o valor que predomina em relação ao primeiro.

**c) Cálculo do Coeficiente de Convecção Interior ( $h_{ei}$ )**

Conforme foi abordado na revisão bibliográfica (secção 2.3.2), as trocas de calor por convecção podem ser designadas pelas trocas que se processam entre um fluido e uma superfície plana vertical. Uma vez realizado o aquecimento da habitação, reúnem-se as condições para que a massa de ar aquecido promova o aquecimento da parede por fenómenos de convecção.

A condutância térmica superficial por convecção pode então ser apresentada na forma adimensional através do designado *número de Nusselt* ( $Nu$ ) (5.11), permitindo quantificar o grau em que o fluxo de calor trocado por convecção se afasta do correspondente à condução pura [34].

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{\lambda_f} \tag{5.11}$$

Em que  $h_c$  representa a condutância térmica superficial por condução ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ );  $L$  a altura do elemento (m), e  $\lambda_f$  a condutibilidade térmica do fluido ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ). Para o cálculo do *número de Nusselt* no caso da parede 1 foi adoptada a equação (5.12), uma vez que os equipamentos de medição encontravam-se aproximadamente a meia altura da parede. A parede 2, tratando-se de uma parede de peitoril cuja altura é de 0,90 m, os equipamentos foram colocados numa zona intermédia (0,5 m do pavimento), o cálculo deverá ser realizado segundo a equação (5.13):

$$NuL = \left[ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2 \tag{5.12}$$

$$Nux = \left( \frac{Ra}{4Pr} \right)^{1/4} \cdot \frac{0,75 \cdot Pr^{1/2}}{(0,609 + 1,221 \cdot Pr^{1/2} + 1,238 \cdot Pr)^{1/4}} \tag{5.13}$$

Em que  $Ra$  representa o número de *Rayleigh*, e  $Pr$  o número de *Prandtl*.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \tag{5.14}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \tag{5.15}$$

Onde  $g$  representa a força da gravidade de  $9,8 m \cdot s^{-2}$ ;  $\beta$  o coeficiente de expansão térmica  $\frac{1}{(tsi+t\infty)/2}$  ( $K^{-1}$ );  $T_s$  e  $T_\infty$  a temperatura superficial e do ambiente interior respectivamente (K);  $L$  a altura do elemento (m);  $\nu$  a viscosidade do ar ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ), e  $\alpha$  a difusividade do ar ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ).

Finalmente, a condutância térmica superficial de convecção interior é dada por:

$$h_{ci} = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{L} \quad 5.16$$

Uma vez que o número de *Rayleigh* varia em função da temperatura superficial da parede e da temperatura do ambiente interior, os valores relativos à condutância térmica de convecção variam consoante a imposição de novas temperaturas a cada espaço temporal de 10 minutos, contribuindo assim para o processo dinâmico do cálculo pelo método das diferenças finitas.

Segue-se o Quadro 5.11 síntese dos valores utilizados para o cálculo de  $h_{ci}$ , com as parcelas de carácter variável correspondentes.

Quadro 5.11 - Valores utilizados para o cálculo de  $h_{ci}$

$T_{si}$	$T_i$	$\beta$	$\nu$	$k$	$\alpha$	$Pr$	$Ra$	$NuL$	$h_c$
Variável	Variável	Variável	1,59E-05	2,63E-02	2,25E-04	7,07E-01	3,03E+09	Variável	Variável

#### d) Cálculo do Coeficiente de Radiação Interior ( $h_{ri}$ )

Da pesquisa realizada anteriormente acerca das trocas de calor por radiação (ver secção 2.3.3), conclui-se que todas as superfícies com temperatura superior a 0 K emitem radiação térmica em função das temperaturas a que se encontram. Assim, considera-se que existirão trocas por radiação entre a parede estudada e as restantes que se encontram no seu campo visual.

Foi então considerado na perspectiva deste cálculo, que o compartimento é um espaço fechado e que ambas as paredes opacas emitem energia radiante por efeito da sua temperatura (Figura 5.11). O estudo incidiu na determinação das trocas de calor existentes entre a parede onde se realizaram os ensaios (A) e as restantes paredes que compõem o compartimento, uma vez que a temperatura na parede A em média era mais baixa que as restantes que compõem o compartimento. O referido estudo será realizado assumindo pressupostos de cálculo que se desviam um pouco da realidade, e como tal, o valor que irá resultar dos cálculos será sempre um valor aproximado, tomado para toda a área da parede (A), onde se incluem as 2 paredes alvo de estudos (0,74 e 0,27 m).

A parede (A) terá então como envolvente duas paredes verticais (B e D), uma paralela (C) o pavimento e o tecto, para cada um destes elementos foram medidas as temperaturas superficiais a cada 10 minutos durante 2 dias (12-07-2011 e 13-07-2011) com recurso a termopares e as condições de obtenção dos dados tiveram lugar durante o aquecimento da habitação. A delimitação das paredes envolventes do compartimento 1 e as temperaturas registadas, podem ser verificados na Figura 5.11 e Figura 5.12.

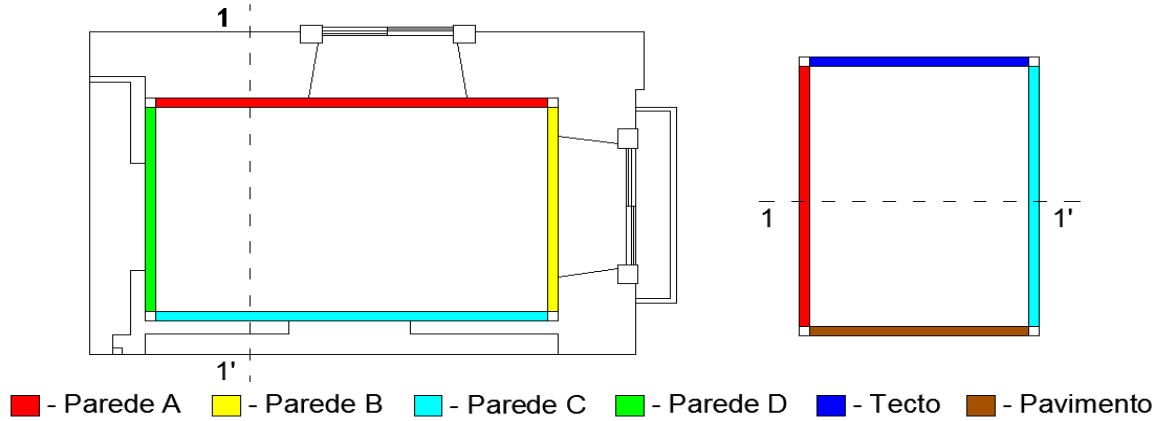


Figura 5.11 - Legenda da envolvente do compartimento 1

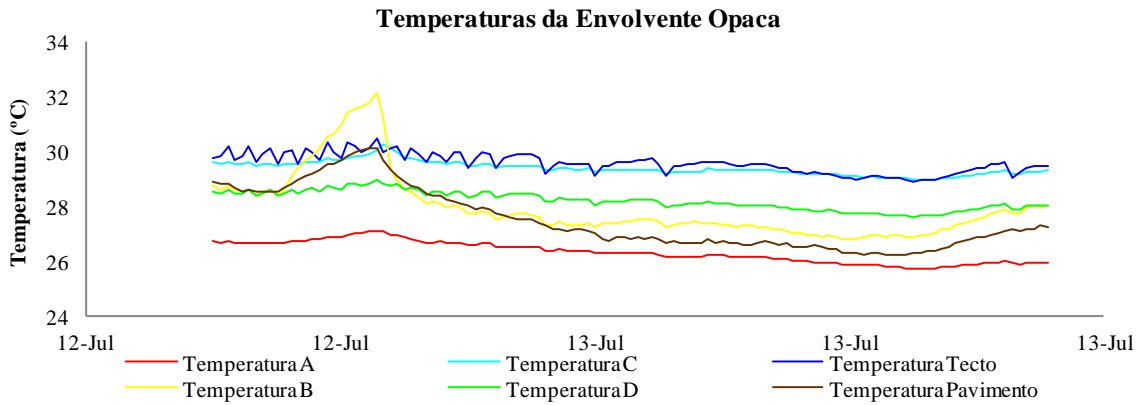


Figura 5.12 - Gráfico das temperaturas da envolvente opaca

Para o cálculo de  $h_{ri}$ , deve ser adoptada a equação (5.17) que tem por base a energia transmitida à superfície. O coeficiente  $Q$  pode ser calculado com recurso aos factores de forma entre superfícies e as temperaturas dos elementos da envolvente da parede de acordo com a equação (5.18).

$$Q = h_r \cdot A_1 \cdot (T_i - T_1) \tag{5.17}$$

Em que,  $Q$  representa a quantidade de calor recebida pela parede estudada ( $W \cdot m^{-2}$ );  $h_r$  o coeficiente de radiação ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ );  $T_i$  e  $T_1$  a temperatura ambiente e temperatura da superfície interior que recebe calor ( $^\circ C$ ), respectivamente, e  $A_1$  a área da superfície que recebe calor.

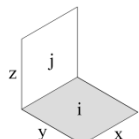
A energia transmitida da superfície  $i$  para a superfície  $j$  é calculada mediante a aplicação de um factor de forma ( $F_{ij}$ ) e a equação é dada por:

$$Q = 0,9 \cdot \sum_{j=1}^N A_i \cdot F_{ij} \cdot \sigma \cdot (T_i^4 - T_j^4) \tag{5.18}$$

O cálculo dos factores de forma (variam entre 0 e 1) e constitui um problema geométrico uma vez que depende essencialmente da forma como as superfícies se posicionam entre si no espaço.

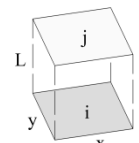
Actualmente, são disponibilizados formulários de cálculo para as situações mais usuais de posicionamento entre os elementos dos edifícios. Uma vez que o compartimento foi considerado fechado, considerou-se os factores de forma relativos às equações (5.19) e (5.20) [42], cujos resultados são apresentados no Quadro 5.12.

**A:**  $H = Z/X$ ;  $W = Y/X$



$$F_{ij} = \frac{1}{\pi \cdot W} \cdot \left( W \cdot \tan^{-1} \cdot \frac{1}{W} + H \cdot \tan^{-1} \cdot \frac{1}{H} - (H^2 + W^2)^{1/2} \cdot \tan^{-1} \frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}} + \frac{1}{4} \cdot \ln \left( \frac{(1 + W^2) \cdot (1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \cdot \left[ \frac{W^2 \cdot (1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(W^2 + H^2)} \right]^{W^2} \cdot \left[ \frac{H^2 \cdot (1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2) \cdot (H^2 + W^2)} \right]^{H^2} \right) \right) \quad 5.19$$

**B:**  $T = X/L$ ;  $M = Y/L$



$$F_{ij} = \frac{2}{\pi \cdot T \cdot M} \left( \ln \left[ \frac{(1 + T^2) \cdot (1 + M^2)}{1 + T^2 + M^2} \right]^{1/2} + T \cdot (1 + M^2)^{1/2} \cdot \tan^{-1} \frac{T}{(1 + M^2)^{1/2}} + M \cdot (1 + T^2)^{1/2} \cdot \tan^{-1} \frac{M}{(1 + T^2)^{1/2}} - T \cdot \tan^{-1} T - M \cdot \tan^{-1} M \right) \quad 5.20$$

As equações indicadas têm por objectivo o cálculo dos factores de forma ( $F$ ) relativos aos elementos que pela sua temperatura, contribuem para o aquecimento por radiação da parede A alvo de estudos. Nesse sentido, a partir da equação (5.19) foi possível calcular o contributo dos elementos horizontais (tecto e pavimento) e verticais (parede B e D), para o caso da parede C foi utilizada a equação (5.20).

Quadro 5.12 - Resultados calculados para factores de forma

Parede A -- C		Parede A -- B		Parede A -- Tecto		Parede A -- D		Parede A -- Pavimento	
<b>X</b>	4,10	<b>X</b>	3,00	<b>X</b>	4,10	<b>X</b>	3,00	<b>X</b>	4,10
<b>Y</b>	3,00	<b>Y</b>	4,10	<b>Y</b>	3,00	<b>Y</b>	4,10	<b>Y</b>	3,00
<b>L</b>	2,50	<b>L</b>	2,50	<b>L</b>	2,50	<b>L</b>	2,50	<b>L</b>	2,50
<b>T</b>	1,64	<b>H</b>	0,83	<b>H</b>	0,61	<b>H</b>	0,83	<b>H</b>	0,61
<b>M</b>	1,20	<b>W</b>	1,37	<b>W</b>	0,73	<b>W</b>	1,37	<b>W</b>	0,73
<b>F<sub>CA</sub></b>	0,30	<b>F<sub>BA</sub></b>	0,15	<b>F<sub>TA</sub></b>	0,20	<b>F<sub>DA</sub></b>	0,15	<b>F<sub>PA</sub></b>	0,20
<b>A<sub>C</sub></b>	12,30	<b>A<sub>B</sub></b>	7,50	<b>A<sub>T</sub></b>	10,25	<b>A<sub>D</sub></b>	7,50	<b>A<sub>P</sub></b>	10,25

A partir da equação (5.18) e dos factores de forma, é possível efectuar o cálculo da energia que é transmitida à parede ( $Q$ ) durante um determinado período de tempo, ficando calculadas todas as variáveis que intervêm na equação (5.17). Deste cálculo resulta o valor do coeficiente da radiação interior ( $h_{ri}$ ) ao longo do tempo, em termos médios o valor estimado é de  $3,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ .

No decorrer do cálculo dinâmico efectuado, uma vez que o coeficiente de radiação interior ( $h_{ri}$ ) constitui um valor fixo de  $3,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  para as paredes 1 e 2, a única parcela do valor que é

alterada é a relativa ao coeficiente de convecção interior ( $h_{ci}$ ). Os valores da resistência térmica superficial interior ( $R_{si}$ ) para ambas as paredes tenderam para valores próximos de 0,21 e 0,23  $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ , pelo que foi admitido para cálculos em regime permanente uma resistência interior de 0,22  $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$  para todas as paredes da envolvente que constituem a habitação estudada, quando a temperatura é próxima de 30  $^\circ\text{C}$  (temperatura de ensaio).

### 5.4.3. Resultados Finais

Depois de determinadas as variáveis que solucionam o cálculo das diferenças finitas para o regime dinâmico de condução de calor pelas paredes, efectuou-se a modelação dos elementos no programa de cálculo realizado a partir do *software Excel*.

As paredes foram subdivididas em 16 camadas o que permite visualizar o comportamento à passagem do fluxo de calor acedendo às temperaturas no interior de cada camada e qual o seu comportamento mediante as alterações das temperaturas ambientes.

Para o cálculo da parede 1, foram consideradas as temperaturas referentes ao período de aquecimento da habitação para efeitos de ensaio (20-05-2011 a 18-06-2011) assim como para a parede 2 (30-06-2011 a 12-07-2011) tendo sido obtidos os resultados expressos nos diferentes gráficos que se apresentam ao longo desta secção. Para a realização deste método, foi necessário introduzir as características térmicas calculadas anteriormente para ambas as paredes, como a condutibilidade térmica equivalente, calor específico e densidade do material. A partir da geração dos resultados, foram obtidos diferentes gráficos para as diferentes paredes, onde serão analisados os desenvolvimentos das curvas e posteriormente comparados os resultados obtidos experimentalmente no edifício e os resultados obtidos pelo modelo numérico.

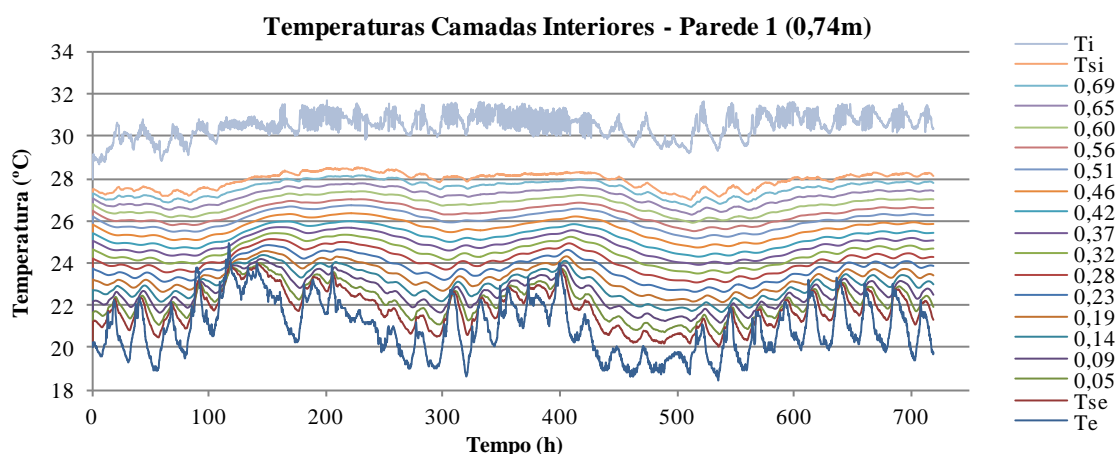


Figura 5.13 - Gráfico da temperatura das camadas interiores - parede 1 (0,74 m)

Da análise à parede 1 observa-se a partir da Figura 5.13, as temperaturas nas diferentes camadas ou “nós” em que foi dividida a parede. Dada a variação da temperatura exterior medida, é perceptível a reacção das camadas adjacentes da parede mais próximas do exterior até à camada

0,56 m, que pelos dados do gráfico são as mais influenciadas pelos acontecimentos de flutuação de temperatura. Nas camadas mais interiores, denota-se uma estabilização da temperatura com uma tendência de acompanhamento das reduzidas variações existentes no ambiente interior. De referir que ao longo do ensaio, o desenvolvimento geral das temperaturas nas camadas interiores da parede apresentam apenas pequenas oscilações (1,5 °C) mesmo perante a flutuação das temperaturas exteriores que se estabelece em cerca de 6 °C.

No sentido de validar os cálculos realizados para o método dinâmico de condução de calor nas paredes 1 e 2 estudadas, apresenta-se na Figura 5.14 um gráfico que permite a comparação entre as temperaturas superficiais calculadas e as obtidas experimentalmente.

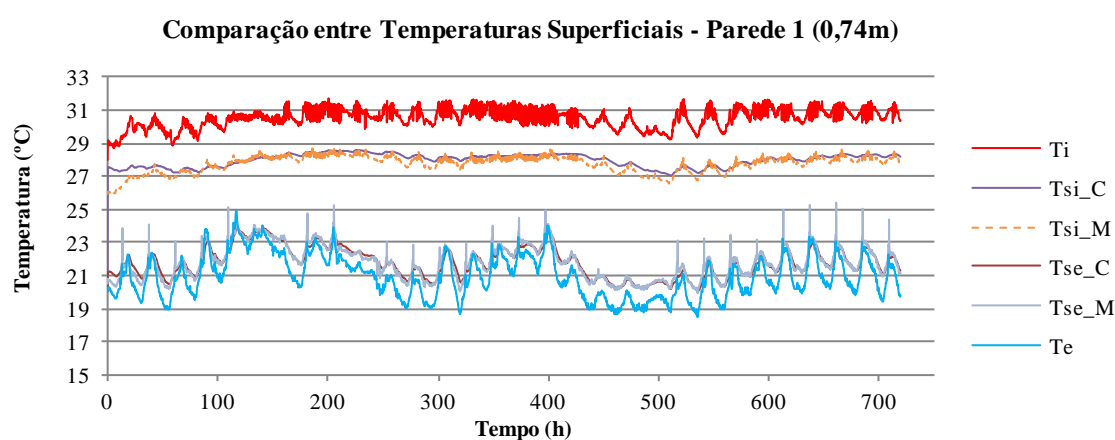


Figura 5.14 - Gráfico de comparação entre temperaturas superficiais - parede 1 (0,74 m)

Pela análise do gráfico, verifica-se a complementaridade entre o desenvolvimento das curvas referentes às temperaturas superficiais calculadas pelo método dinâmico ( $T_{si\_C}$  e  $T_{se\_C}$ ) e as medidas “*in situ*” ( $T_{si\_M}$  e  $T_{se\_M}$ ). Para a superfície exterior existe quase uma sobreposição das temperaturas superficiais medidas e calculadas, sendo de referir que a resistência térmica superficial exterior anteriormente calculada está de acordo com o comportamento real da parede do saguão.

A partir da análise dos resultados para as temperaturas superficiais interiores, verifica-se a influência da resistência térmica superficial associada à parede 1, apresentando os resultados do modelo de cálculo um desenvolvimento semelhante aos valores medidos, validando assim o cálculo efectuado no âmbito das resistências de convecção ( $h_{ci}$ ) e radiação ( $h_{ri}$ ). O mesmo raciocínio é válido para o paramento exterior e respectiva resistência térmica superficial calculada.

Depois de avaliadas as temperaturas e resistências térmicas superficiais, foi realizada uma simulação de transferência de calor pela parede 1 a partir de um gráfico dinâmico, que traduz o processo de aquecimento das camadas ou “nós” a partir das condições iniciais (20 °C), até ao fim do período de aquecimento (Figura 5.15).

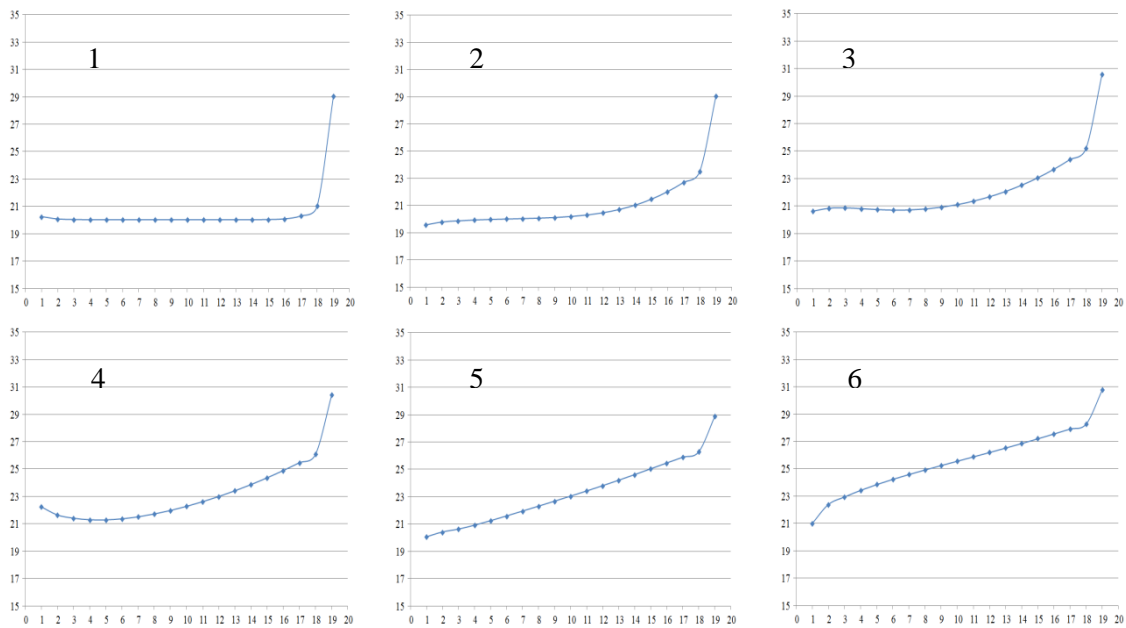


Figura 5.15 – Gráficos do processo de aquecimento da parede 1: Abcissas - Número de nós; Ordenadas - Temperatura

A Figura 5.15 representa numa sequência de gráficos, o comportamento dinâmico da parede 1 (0,74 m), influenciada pelo aquecimento da habitação durante o período de ensaio. A partir dos referidos gráficos, é possível verificar o aquecimento sequencial dos nós em que foi dividida a parede, onde nas ordenadas são representadas as temperaturas e nas abcissas o número dos nós respectivos, sabendo que os pontos extremos representam as temperaturas exteriores (esquerda) e interiores (direita), seguindo-se as temperaturas superficiais e depois os pontos interiores da parede. A partir dos dados obtidos analiticamente, foi possível verificar que a parede 1 necessita de aproximadamente 132 h, cerca de 5,5 dias, para atingir um regime “quase-permanente” de transferência de calor. Estes resultados correspondem ao tempo que o fluxo de calor necessita para percorrer toda a espessura da parede, validando de certa forma o desfasamento entre os picos de fluxo medido no interior e exterior, avaliado em capítulos anteriores.

Para a parede 2 (0,27 m) foram realizados estudos com igual metodologia, tendo sido obtidos os resultados que se apresentam de seguida.

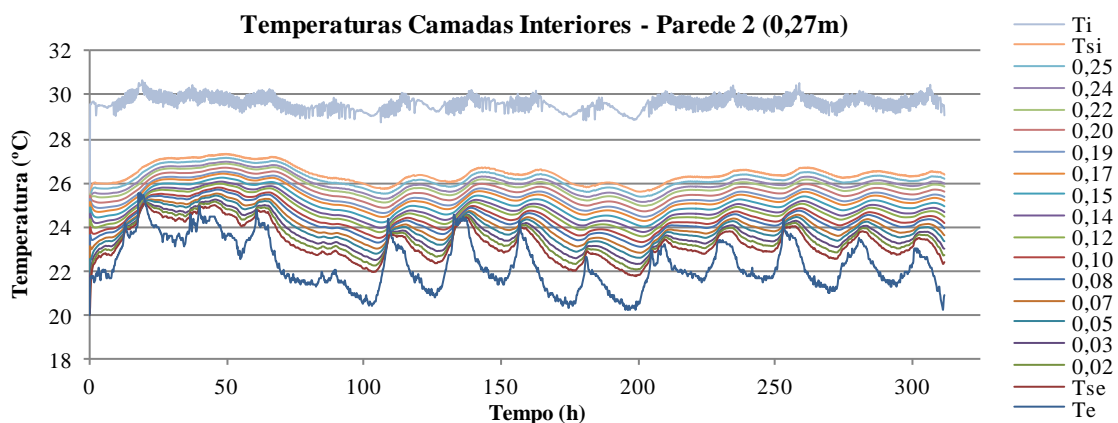


Figura 5.16 - Gráfico das temperaturas das camadas interiores - parede 2 (0,27 m)

Para a parede 2, verifica-se que as temperaturas nas camadas interiores da parede apresentam um carácter dinâmico, uma vez que respondem quase de imediato a flutuações da temperatura. Por outro lado, as temperaturas superficiais encontram-se algo distantes das temperaturas medidas no ambiente exterior e principalmente no ambiente interior. Este facto deve-se às elevadas resistências superficiais, podendo ser confirmado este aspecto a partir da Figura 5.17.

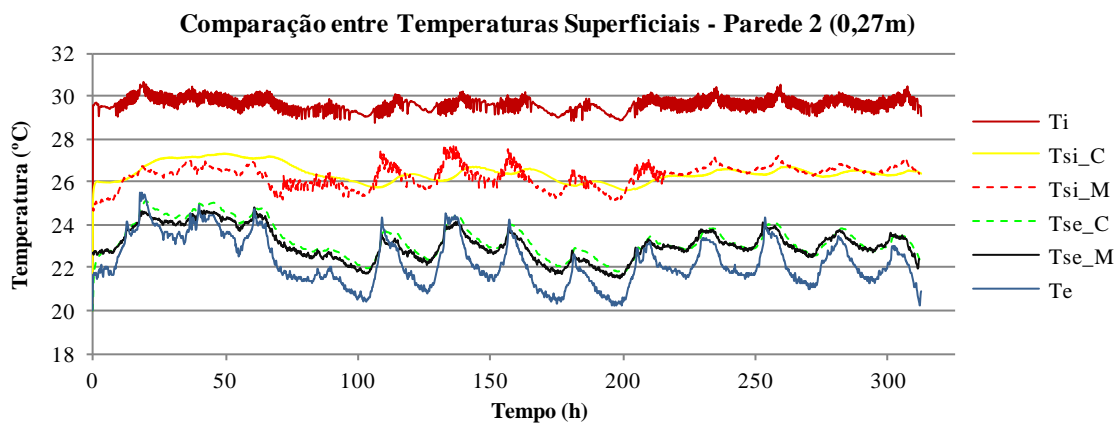


Figura 5.17 - Gráfico de comparação entre temperaturas superficiais - parede 2 (0,27 m)

No paramento exterior, as diferenças entre as temperaturas superficiais lidas ( $Tse_M$ ) e as calculadas ( $Tse_C$ ) tendem para um desenvolvimento semelhante e em certos casos é visível a sobreposição das curvas. Para o paramento interior existe desde o início, até aproximadamente às 225 h, um desencontro entre os valores medidos ( $Tsi_M$ ) e os valores calculados ( $Tsi_C$ ). Para este período, verifica-se que o desenvolvimento da curva relativa a  $Tsi_M$  acompanha o desenvolvimento da curva delineada para a temperatura exterior  $Te$ , o que demonstra a influência das variações de temperatura no ambiente exterior.

Como já foi anteriormente referido, até ao dia 9-07-2011 que corresponde a 216 h de ensaio, as condições interiores da parede de peitoril foram certamente influenciadas pelas más condições de estanquidade ao ar da janela, tendo sido realizada a completa vedação nessa data, anulando o efeito das possíveis infiltrações de ar. Como é visível pelo gráfico da Figura 5.17, a partir do dia da intervenção as leituras da temperatura superficial interior estabilizaram e de certa forma acompanham o desenvolvimento da temperatura superficial calculada. A partir das conclusões que resultaram da análise do gráfico à parede 2, a opção tomada no cálculo da resistência térmica da parede em apenas incluir os últimos 4 dias de ensaio (9-05-2011 a 12-05-2011) foi assertiva.

Para a parede 2 foi realizado o estudo relativo ao processo dinâmico de aquecimento dos “nós” ao longo da sua espessura. Da análise da Figura 5.18, é possível verificar a susceptibilidade da parede às variações que ocorrem no exterior e interior. Neste caso não é possível assegurar uma transferência de calor em regime “quase-permanente” devido à flutuação das temperaturas no interior da parede, no entanto, desde o início do aquecimento são necessárias cerca de 41 h (1,7 dias) para atingir nas camadas mais próximas da superfície interior, a temperatura de 26 e 27 °C.

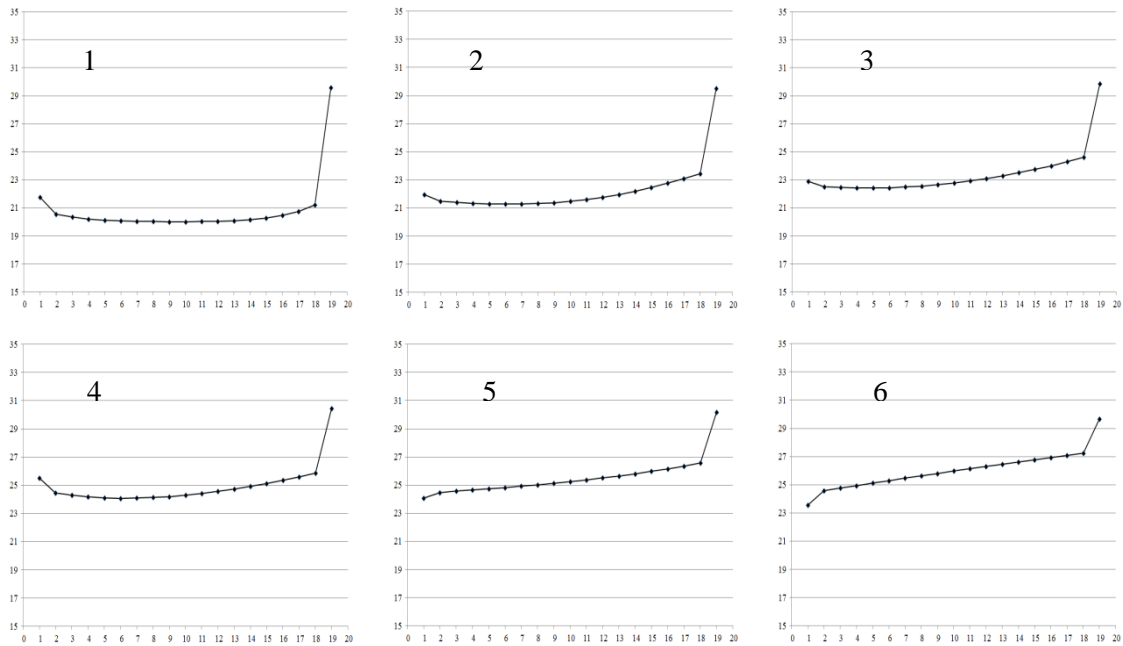


Figura 5.18 - Gráficos do processo de aquecimento da parede 2: Abcissas - Número de nós; Ordenadas - Temperatura

## 5.5. Avaliação Experimental das Necessidades de Aquecimento – Método do Aquecimento

### 5.5.1. Resultados Experimentais

Os resultados experimentais obtidos são referentes ao período de ensaios que decorreram entre 20-05-2011 e 12-07-2011 e que corresponderam ao período de aquecimento global da habitação estudada. Nesta secção apresentam-se os dados relativos às temperaturas, radiação solar e energia consumida em forma de gráficos que serão posteriormente alvo de análise.

Apresenta-se em seguida na Figura 5.19, as temperaturas dos ambientes relevantes para o processo de avaliação experimental das necessidades de aquecimento da habitação.

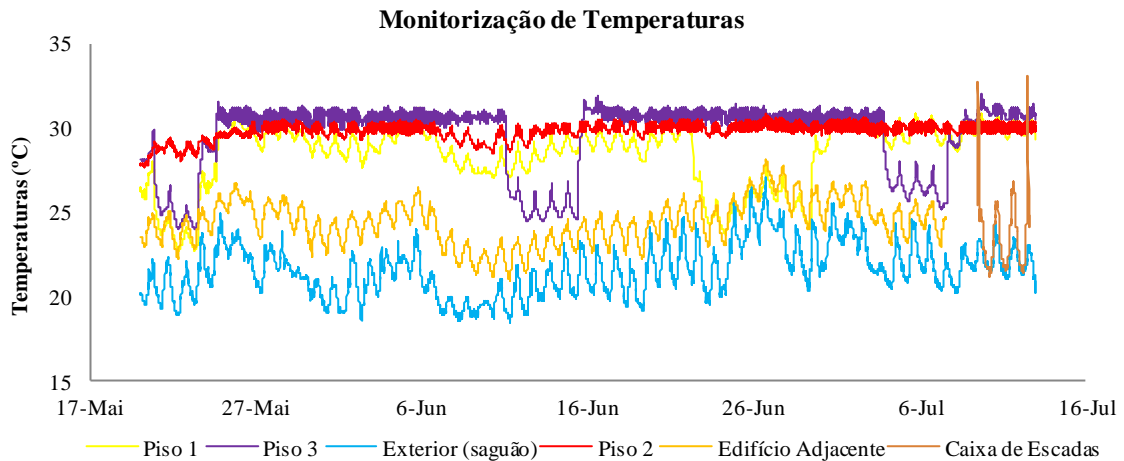


Figura 5.19 - Gráfico de monitorização das temperaturas

A monitorização da temperatura foi então realizada no interior das habitações do piso 1, 2 e 3, no exterior (saguão), nos espaços não climatizados como na caixa de escadas e a uma cota intermédia do piso 2 do edifício adjacente junto à parede de separação com o edifício estudado. De acordo com os dados do gráfico (Figura 5.19), verifica-se que as temperaturas nos diferentes pisos são bastante semelhantes, registam-se porém algumas quedas de temperatura no piso 1 e 3 referentes a interrupções do processo de aquecimento. De uma forma geral, pelas diferenças de temperaturas registadas entre as diferentes zonas pode dizer-se que, ao longo do ensaio existiram perdas de calor de forma contínua do interior da habitação para o ambiente exterior, caixa de escadas e edifícios adjacentes. Para determinar a temperatura interior da habitação no âmbito do método do aquecimento, foi considerada a média entre os valores registados em dois sensores de temperatura situados entre o compartimento 1 e 2 e no compartimento 4 (ver anexo A, desenho D4).

Uma vez determinadas as temperaturas dos ambientes exterior ( $T_e$ ) e interior ( $T_i$ ) ao longo do tempo, estão reunidas as condições para o cálculo do número de graus-dia de aquecimento ( $GD$ ) referentes à habitação no período de análise, através da equação (5.21).

$$GD = \frac{\sum T_i - T_e}{24} \quad 5.21$$

O valor dos graus-dia de aquecimento para o período de ensaio é de 445 °C·dia. As temperaturas médias relevantes para cálculos posteriores são as apresentadas no quadro seguinte:

Quadro 5.13 - Temperaturas médias

Interior	Exterior	Edifício Adjacente	Caixa de Escadas
29,8 °C	21,6 °C	24,4 °C	23,2 °C

A determinação da radiação solar foi um dos procedimentos de ensaio do método do aquecimento. Na Figura 5.20 são apresentados os dados relativos à radiação transmitida pelos envidraçados (janela de sacada), com orientação a Sudeste medidos por um piranómetro.

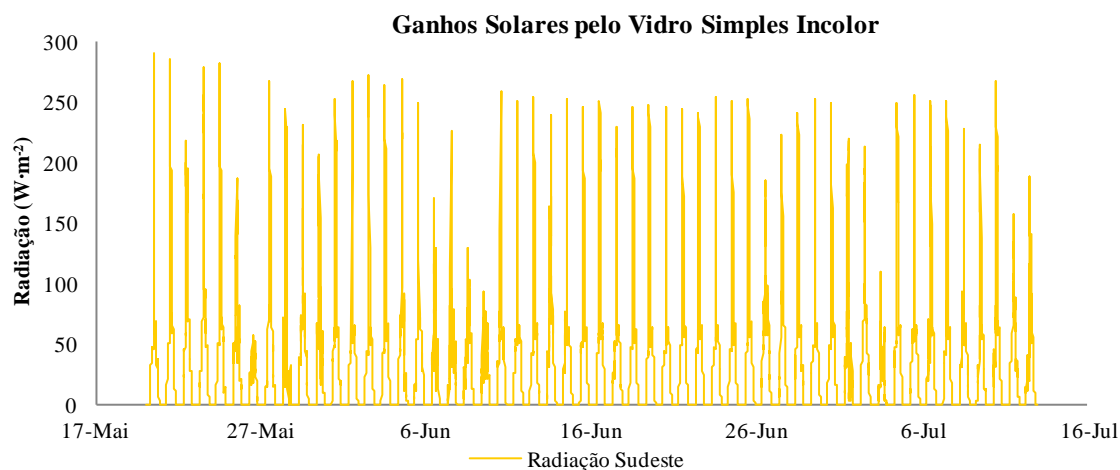


Figura 5.20 - Gráfico dos ganhos solares pelo vidro simples incolor na fachada Sudeste

O gráfico apresentado é referente aos ganhos solares pelos envidraçados medidos pelo piranómetro no interior da habitação, pelo que são afectados do factor solar do vidro simples e do factor de selectividade angular. Os resultados obtidos são fortemente influenciados pelos edifícios adjacentes, uma vez que são mais altos e as suas empenas são bastante mais compridas do que o edifício estudado, causando focos de sombreamento no local ao longo do dia. Ainda assim, é possível verificar a existência de vários picos de radiação, que correspondem ao período do dia em que o sol incide com mais intensidade nos envidraçados da janela de sacada, onde o valor máximo é atingido diariamente por volta das 12 h, nunca tendo ultrapassado os  $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Existiram também dias de menor intensidade solar, devido à existência de nebulosidade sendo que o valor mínimo aconteceu em 26-05-2011 registando um pico de apenas  $52 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , que se estima ser referente à radiação difusa e reflectida. Em média, foram captados pelo piranómetro  $42,4 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$  que incidiram nos envidraçados a Sudeste, considerando que o valor é somente captado pela área de vidro existente na fachada ( $3,06 \text{ m}^2$ ), obtêm-se ganhos pelos envidraçados de  $129,8 \text{ kWh}$ . Admitiu-se nesta situação que ambas as janelas de sacadas orientadas a Sudeste, dispõem da mesma intensidade solar incidente.

Apresentam-se de seguida na Figura 5.21, os resultados relativos à energia consumida pelos aquecedores do piso 2 ao longo do período experimental.

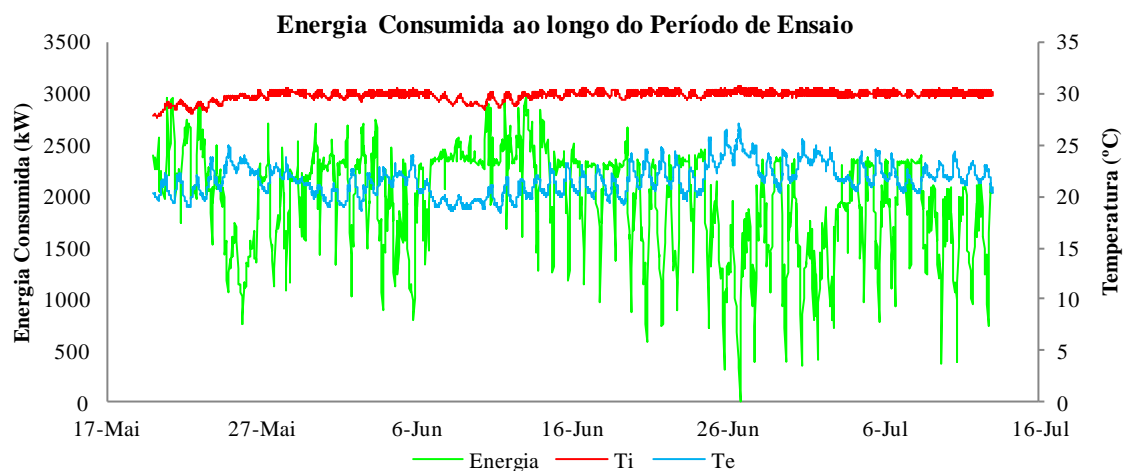


Figura 5.21 - Gráfico da energia consumida ao longo do período de ensaio

O desenvolvimento da curva da energia e das temperaturas foi resultado de médias realizadas de hora a hora. O gráfico apresenta um desenvolvimento com vários picos de consumo ao longo do dia, dado o funcionamento do termóstato que permitiu controlar a temperatura da habitação ao interromper a corrente eléctrica sempre que a temperatura excedesse os  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Esta acção impôs consumos momentâneos de  $0 \text{ kWh}$ , até a temperatura voltar aos valores pretendidos.

Verifica-se também que a intensidade de funcionamento dos aquecedores é dependente da temperatura que se faz sentir no exterior da habitação, mediante o aumento da temperatura exterior a energia consumida desce, sendo o inverso igualmente válido durante o período de

ensaio. Por outro lado, as temperaturas interiores da generalidade da habitação, apresentam-se ao longo dos ensaios bastante estáveis, em média 29,8 °C, valor muito próximo da temperatura inicialmente pretendida (30 °C).

Das medições de energia que representam as necessidades térmicas de aquecimento da habitação, obteve-se um resultado igual a 2504,4 kWh para o período de ensaio.

Os resultados obtidos através dos contadores de energia, e a energia em forma de calor transmitido pelos envidraçados, serão objecto de análise e comparação com o cálculo das necessidades térmicas de aquecimento do edifício, utilizando para o efeito a metodologia de cálculo de regime estacionário (ISO 13790 [3] e RCCTE [2]).

## 6. MODELO TÉRMICO DA HABITAÇÃO - VALIDAÇÃO

### 6.1. Modelo de Simulação Térmica da Habitação – Modelo de Regime Estacionário – Condições de Ensaio

#### 6.1.1. Balanço Térmico Global da Habitação

No presente capítulo pretende-se validar o modelo térmico associado ao processo experimental, mediante a comparação com o cálculo realizado a partir dos princípios do modelo de regime estacionário ISO 13790 [3] e RCCTE [2]. Face ao modelo de regime estacionário adoptado, serão determinadas as necessidades nominais de aquecimento da habitação para as condições de ensaio a partir da equação (6.1).

$$Nic = \left[ 0,024 \cdot GD \cdot \sum \text{Perdas (Paredes Ext. + Vãos Envi. + Paredes Int.)} + \text{Renovação do ar Int.} - \text{Ganhos Envi.} \right] / (\text{Área Útil Pav.}) \quad 6.1$$

O número de graus dia (GD) resulta das temperaturas obtidas através do método do aquecimento e o seu valor é de 445 °C·dia. Este valor é correspondente ao número de graus dia de ensaio e determina as necessidades de aquecimento da habitação.

As características dimensionais e construtivas da habitação estão descritas nos subcapítulos 3.3 e 3.4. Nas secções seguintes são apresentadas as diversas parcelas do balanço térmico da habitação estudada. Nesta perspectiva são consideradas as resistências térmicas superficiais correspondentes às condições ambientais durante os ensaios.

Na Figura 6.1 estão representadas as envolventes exteriores e interiores onde existem perdas de calor no âmbito do ensaio experimental.

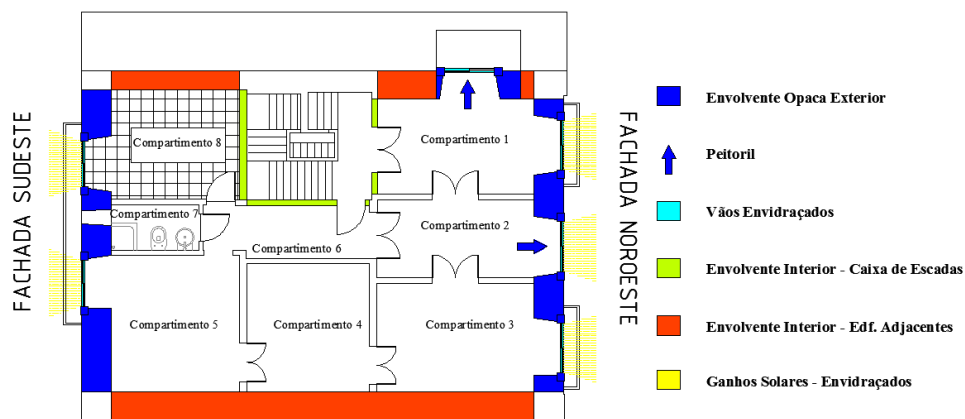


Figura 6.1 – Perdas e Ganhos de calor pelas envolventes consideradas – Condições de ensaio

### 6.1.2. Perdas por Renovação do Ar Interior

No âmbito do presente trabalho de validação do modelo térmico, o número de renovações horárias ( $R_{ph}$ ) foi determinado no estudo experimental realizado por Silva (2011) [35], que incidiu na habitação do piso 2 do edifício “Gaioleiro”. O valor de renovações horárias, para as condições específicas da habitação (29,8 °C) que resulta da avaliação experimental é de 1,4 h<sup>-1</sup>.

Utilizando a equação (6.2) e tendo em conta que o volume ( $V$ ) associado à habitação estudada é de 226 m<sup>3</sup>, o valor das perdas térmicas resultantes da renovação do ar é de 108 W·°C<sup>-1</sup>, o que equivale a perdas ao longo do período de ensaio de 1151 kWh.

$$\text{Perdas Renovação do Ar Interior} = 0,024 \cdot (0,34 \cdot R_{ph} \cdot V) \cdot GD \quad 6.2$$

### 6.1.3. Perdas Superficiais pela Envolvente Exterior

As perdas pela envolvente exterior estão associadas à condução de calor pelos elementos da envolvente nomeadamente as paredes exteriores e os vãos envidraçados. Como já foi abordado anteriormente, as paredes da habitação em contacto com o exterior estão orientadas a Sudeste, Noroeste e a Sudoeste, no último caso para o saguão do edifício.

As paredes com maior espessura variam ligeiramente consoante a orientação sendo que as de fachada possuem 0,77 m e a do saguão 0,74 m. Com a determinação experimental das propriedades térmicas das paredes relativas ao saguão, os valores foram adaptados às restantes paredes devido às espessuras próximas entre elementos e dado o material que as constitui ser o mesmo, portanto, para as paredes de elevada espessura admite-se uma  $\lambda_{eq,parede} = 1,38 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ . O mesmo raciocínio é válido para as paredes de peitoril com 0,27 m de espessura, orientadas a Noroeste e no saguão cuja  $\lambda_{eq,parede} = 1,17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ .

Foi considerada a variação da condutibilidade térmica equivalente e da espessura das paredes, pela existência de revestimento de azulejo cerâmico. Assim, para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica na fachada Noroeste (compartimentos 1, 2 e 3) foi tomado em consideração o revestimento exterior de azulejo cerâmico, assim como a existência do mesmo material no revestimento interior até 1,5 m de altura na parede do compartimento 8 (cozinha) e na totalidade da parede do compartimento 7 (casa de banho).

A habitação possui seis vãos, sendo que quatro são de sacada e dois de peitoril e um vão de pequenas dimensões no compartimento 7. A transmissão de calor através das janelas foi estimada utilizando valores aplicáveis a caixilharia exterior de madeira semi-densa com vidro simples incolor. Para os vãos de sacada, considerou-se uma percentagem de 50% madeira e 50% de vidro e nos vãos de peitoril e compartimento 7 foram admitidos 70% vidro e 30% de madeira e alumínio respectivamente.

O vão envidraçado do saguão possui portadas de madeira, tendo sido este facto desprezado uma vez que se encontravam em mau estado de conservação e durante os ensaios as portadas foram deixadas completamente abertas, pelo que as mesmas não foram consideradas no cálculo do coeficiente de transmissão térmica. As janelas estão ligadas às paredes de envolvente por intermédio de uma pedra de cantaria de calcário macio que possuem um revestimento de madeira semi-densa no paramento interior. As condutibilidades térmicas equivalentes dos materiais referidos nesta secção estão indicadas no Quadro 3.2 referente ao subcapítulo 3.3.

Nesta análise, os valores dos coeficientes de transmissão térmica das paredes foram ajustados a partir dos valores das resistências térmicas superficiais interiores médias correspondentes às condições existentes calculados no âmbito do capítulo 5.4.2. Nessa perspectiva, os valores utilizados são apresentados no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 - Resistências térmicas superficiais

$R_{si}$	$R_{se}$ (Saguão)	$R_{se}$ (NO / SE)	Unid.
0,22	0,08	0,04	$m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$

Para determinar o coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) para o período de ensaio, foi utilizada a equação (6.3) para os diferentes elementos. No Quadro 6.2, apresentam-se os valores de  $U$  calculados para as paredes da envolvente em contacto com o exterior e vãos envidraçados, assim como as áreas dos respectivos elementos, sendo estimado o consumo de energia no período de ensaio dado pela equação (6.4). O cálculo detalhado do  $U$  associado a cada elemento da envolvente, está disponível no anexo E para a temperatura de 30 °C.

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \tag{6.3}$$

$$Perdas\ Envolvente\ Exterior = 0,024 \cdot U \cdot A \cdot GD \tag{6.4}$$

Quadro 6.2 - Perdas superficiais pela envolvente exterior

Orientação	Paredes								Vãos Envidraçados				
	SE		NO		SE/NO	Saguão			NO		SE		Saguão
Informação Envolvente	Parede 0,77 m	Parede 0,775 m	Parede 0,775 m	Parede 0,275 m	Cantaria	Parede 0,74 m	Parede 0,27 m	Cantaria	Sacada	Peitoril	Sacada	WC	Peitoril
	RR	RI	RE	RE		RR	RR						
Dimensão (m <sup>2</sup> )	10,07	5,67	11,05	1,32	1,90	3,17	1,32	0,26	3,32	2,15	3,06	0,12	2,15
$U_{ensaio}$ (W·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	1,23	1,22	1,22	2,03	1,39	1,20	1,89	1,32	3,10	3,40	3,10	3,81	3,00
Perdas (W/°C)	44,69								53,72				
Perdas (kWh)	477,56								574,05				

RE - Revestimento exterior de azulejo cerâmico e interior de reboco

RI - Revestimento interior de azulejo cerâmico e exterior de reboco

RR - Revestimento exterior e interior de reboco

#### 6.1.4. Perdas por Pontes Térmicas

No sentido de estimar as perdas térmicas relativas à envolvente exterior, devem ser também determinadas as pontes térmicas associadas a singularidades existentes. Devido ao facto do edifício objecto de estudo não possuir na sua estrutura pilares e vigas, não existem pontes térmicas planas, tendo somente relevância as perdas devido às pontes térmicas lineares.

Para estimar o efeito das pontes térmicas lineares (PTL), foi realizada uma análise de condução de calor bidimensional utilizando um modelo de diferenças finitas, aplicado pelo *software Therm* [57]. A partir do programa de cálculo, foi determinado o coeficiente global de transmissão térmica da habitação para a envolvente opaca em contacto com o exterior e estimadas as perdas globais ( $W \cdot ^\circ C^{-1}$ ). A diferença entre os resultados do coeficiente global de transmissão térmica e as perdas pelas zonas correntes dos elementos da envolvente em contacto com o exterior, corresponde ao valor das pontes térmicas lineares.

Atendendo à configuração dos vãos, a modelação da habitação no *software* foi realizada por 3 níveis de altura, o primeiro dos 0 m aos 0,90 m com o intuito da inclusão das paredes de peitoril (0,27 m), de fachada (0,77 m), do saguão (0,74 m) e parte das janelas de sacada, o segundo nível entre os 0,90 m e 2,55 m é referente ao restante das janelas de sacada e contempla ainda as janelas de peitoril, as paredes de fachada e saguão. O terceiro e último nível 2,55 m e 3,0 m corresponde ao intervalo de altura onde a espessura é constante nas paredes de fachada e saguão, podendo desta forma ser estimadas as perdas pela envolvente exterior do edifício de uma forma pormenorizada. É importante salientar que no processo, os vãos envidraçados constituíram elementos adiabáticos onde não ocorre transferência de calor, para que as perdas de calor incidissem somente na envolvente opaca e assim ser possível determinar as perdas lineares.

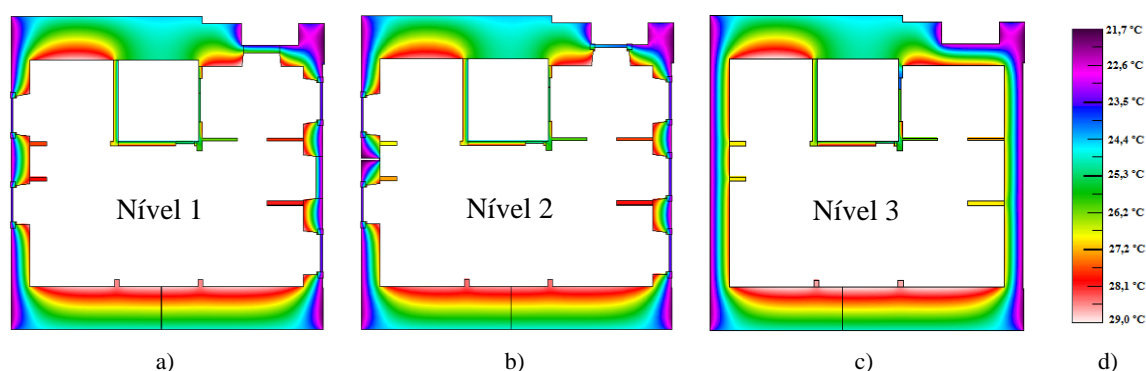


Figura 6.2 - Comportamento térmico da habitação por níveis (condições de ensaio): a) Nível 1 (0 a 0,90 m); b) Nível 2 (0,90 a 1,65 m); c) Nível 3 (1,65 a 3 m); d) Escala de temperatura ( $^\circ C$ )

Na análise que envolve os 3 níveis apresentados, as pontes térmicas lineares incidem essencialmente na ligação entre os vãos envidraçados e a cantaria, em perdas lineares existentes na ligação entre paredes verticais e nas faces laterais das paredes em contacto com o exterior, que

como é possível observar no exemplo demonstrado na Figura 6.3, correspondem ao carácter bidimensional dos vectores do fluxo de calor, fenómeno contribui para o aumento das necessidades energéticas da habitação.

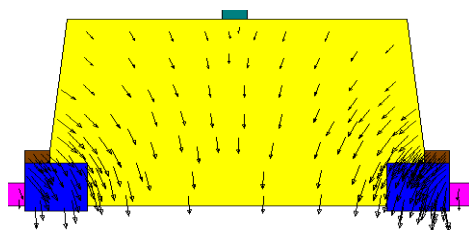


Figura 6.3 – Exemplo do comportamento bidimensional das linhas de fluxo (PTL)

Foram ainda realizadas análises num plano vertical da habitação onde foram também estimadas as pontes térmicas relativas ao efeito do contorno do vão das janelas, ligações da fachada com pavimentos intermédios e a ligação da fachada às varandas Figura 6.4.

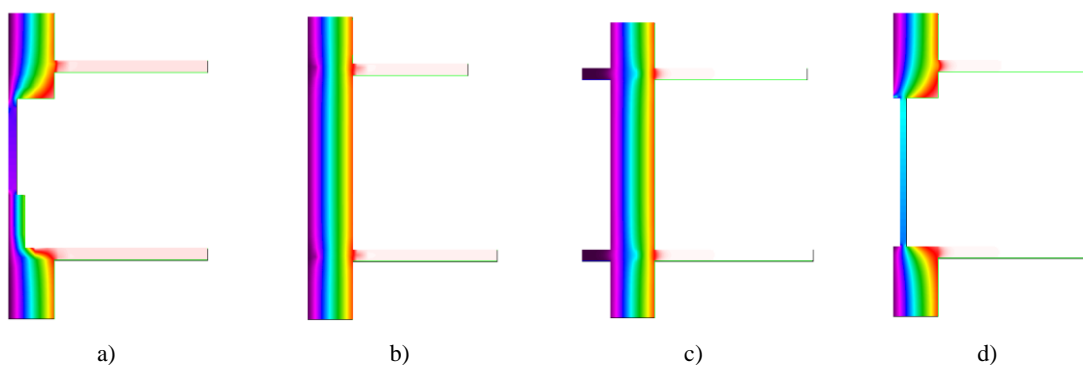


Figura 6.4 – Pontes térmicas lineares: Ligação a) Pavimento c/parede (0,27 m); b) Pavimento c/ parede (0,77 m); c) Fachada c/ Varanda; d) Parede c/ vão da janela

Os resultados obtidos através do cálculo bidimensional (*Therm*) são apresentados no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Perdas pela envolvente em contacto com o exterior (análise bidimensional)

	Nível 1 (0,90 m)	Nível 2 (1,65 m)	Nível 3 (0,45 m)	Parede Janela	Pavimento Parede Espessa	Pavimento Parede Fina	Fachada Varanda
<b>h (m)</b>	0,90	1,65	0,45	-	-	-	-
<b>L (m)</b>	19,46	17,47	17,52	7,60	10,32	2,94	21,62
<b>U (W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup>)</b>	1,25	1,20	1,26	-	-	-	-
<b>Perdas (W·°C<sup>-1</sup>)</b>	21,84	34,45	9,96	3,68	1,47	1,46	3,77

Deste modo, as perdas totais estimadas para a habitação resultado da análise bidimensional realizada são cerca de 76,64 W·°C<sup>-1</sup>, que engloba perdas pela zona corrente (elementos opacos) em contacto com o exterior e pontes térmicas lineares. Assim, as pontes térmicas lineares associadas à habitação estão representadas no Quadro 6.4.

Quadro 6.4 - Pontes térmicas lineares

$\Sigma A \cdot U$ (Zona Corrente)	44,69	W·°C <sup>-1</sup>
Perdas Globais ( <i>Therm</i> )	76,64	
P.T.L. ( <i>Lpt</i> ).	31,95	

Durante o período de ensaio, a energia necessária para compensar as perdas térmicas lineares é dada pela equação (6.5) e o valor é de 341,42 kWh.

$$\text{Perdas P.T.L.} = 0,024 \cdot Lpt \cdot GD$$

6.5

### 6.1.5. Perdas Superficiais pela Envolvente Interior

A temperatura média à qual se submeteu o interior da habitação é superior às registadas na caixa de escadas e nos edifícios adjacentes, considerou-se por esse motivo que existem trocas de calor entre os ambientes (ver Figura 5.19).

Da inspecção realizada às paredes de empena em contacto com edifícios adjacentes, verificou-se que as mesmas eram constituídas pelo mesmo material das paredes de fachada, sendo por isso aplicável a condutibilidade encontrada para a parede do saguão  $\lambda_{eq.parede} = 1,38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ . Quanto à espessura destes elementos, considerou-se que teriam aproximadamente o dobro da espessura das estudadas no saguão (1,5 m) uma vez que foi considerada a espessura da empena do edifício estudado, mais a empena do edifício adjacente.

As paredes que separam o interior da habitação com a caixa de escadas são de dois tipos, frontal e tabique. A primeira possui uma espessura de 0,20 m, tendo sido utilizada a condutibilidade relativa à parede 2 (0,27 m) estudada,  $\lambda_{eq.parede} = 1,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ , devido à aproximação de espessuras ainda que nesta parede existam elementos de madeira. As restantes são paredes de tabique com espessura de 0,15 m e são constituídas por madeira e argamassa de cal e areia tendo sido considerado que 70% referente a madeira semi-densa e 30% de argamassa. Foi considerada também a existência de duas portas de entrada para a habitação de madeira, que se considerou igualmente de madeira semi-densa.

No que diz respeito às resistências térmicas superficiais, foi admitido no processo de cálculo que a resistência térmica no interior da habitação se mantém ( $R_{si} = 0,22 \text{ m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{W}^{-1}$ ), e para os locais não aquecidos  $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{W}^{-1}$ , uma vez que as condições térmicas da caixa de escadas e as habitações dos edifícios adjacentes não foram alvo de alterações.

Para calcular a transmissão de calor entre os ambientes interiores e espaços não aquecidos, foram consideradas as temperaturas médias do Quadro 5.13 no sentido de calcular o valor médio do coeficiente de redução de perdas ( $\tau$ ) determinado experimentalmente a partir da equação (6.6).

$$\tau = \frac{\theta_i - \theta_a}{\theta_i - \theta_{atm}} \quad 6.6$$

Onde  $\theta_i$  representa a temperatura interior (°C);  $\theta_a$  a temperatura do local não aquecido (°C), e  $\theta_{atm}$  a temperatura do ambiente exterior (°C). Efectivamente, a caixa de escadas era fortemente ventilada devido à existência de aberturas na clarabóia da caixa de escadas e a um dispositivo com grelhas de aproximadamente 1 m<sup>2</sup> situado sobre a porta de entrada no edifício, o mesmo se passa com a habitação do edifício adjacente, uma vez que existem janelas danificadas. Os valores determinados para os coeficientes de redução de perdas para os espaços não climatizados apresentam-se no Quadro 6.5.

Quadro 6.5 - Coeficiente de redução de perdas ( $\tau$ ) para espaços não climatizados

Caixa de Escadas	Edifícios Adjacentes
$\tau = 0,82$	$\tau = 0,69$

As perdas térmicas (kWh) para o período de ensaio para elementos em contacto com locais não aquecidos são dadas pela equação (6.7), sendo apresentado em seguida no Quadro 6.6, os resultados finais. De referir que o cálculo detalhado do U dos elementos da envolvente interior está disponível no anexo E para a temperatura de 30 °C.

$$\text{Perdas Envolvente Interior} = 0,024 \cdot U \cdot A \cdot \tau \cdot GD \quad 6.7$$

Quadro 6.6 - Perdas térmicas pela envolvente interior

Orientação	Edf. Adjacente	Caixa de Escadas		
Informação	Parede 1,5 m	Parede Frontal 0,20 m	Parede Tabique 0,15 m	Portas
Dimensão (m <sup>2</sup> )	47,4	8,55	12,72	5,96
$U_{ensaio}$ (W·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	0,70	1,92	1,32	1,75
Perdas (W·°C <sup>-1</sup> )	58,39			
Perdas (kWh)	623,95			

### 6.1.6. Ganhos Solares pelos Envidraçados e pelas Paredes

Dos resultados experimentais para o período de ensaio, resultaram ganhos solares pelos envidraçados a Sudeste de 42,4 kWh·m<sup>-2</sup>. Para estimar a parcela relativa à incidência solar na fachada Noroeste, foi aplicada uma correcção segundo a equação (6.8) tendo por base a informação do *SolTherm* (ST) acerca da radiação solar incidente a Sudeste e a Noroeste do ano climático de referência de Lisboa.

$$\text{Radiação NO} = \frac{\text{RadMSE} \cdot \text{RadSTNO}}{\text{RadSTSE}} \quad 6.8$$

Onde  $RadMSE$  representa a radiação medida na fachada Sudeste ( $W \cdot m^{-2}$ );  $RadSTNO$  e  $RadSTSE$  as radiações incidentes a Noroeste e Sudeste respectivamente dadas pelo  $SolTherm$  ( $W \cdot m^{-2}$ ). As radiações incidentes medidas e estimadas nas fachadas e vãos envidraçados estão disponíveis no anexo G.

Uma vez que o piranómetro estava colocado no interior da habitação, houve necessidade de corrigir os valores lidos pelo factor de selectividade angular dos envidraçados ( $F_w = 0,90$ ) e do factor solar para a radiação incidente na perpendicular ao envidraçado ( $g_{\perp} = 0,85$ ). Com base nesta metodologia de cálculo, estimam-se ganhos solares a Noroeste de  $54,0 kW \cdot m^{-2}$  que serão convertidos em ganhos pelos envidraçados ao multiplicar pela área de vidro correspondente, a soma dos resultados obtidos a Sudeste e os estimados a Noroeste constituem os ganhos solares brutos pelos envidraçados para a habitação estudada (Quadro 6.7).

Quadro 6.7 - Ganhos solares brutos pelos envidraçados

Fachada	Ganhos Solares	Área de vidro	Ganhos Solares Brutos	
SE	42,4 $kWh \cdot m^{-2}$	3,1 $m^2$	129,8 kWh	314,21 kWh
NO	54,0 $kWh \cdot m^{-2}$	4,8 $m^2$	184,4 kWh	

Para os cálculos efectuados, não foi contabilizada a janela relativa ao compartimento 7 (SE) nem a janela do saguão, uma vez que as mesmas se encontram fortemente sombreadas comparativamente às restantes.

Como se obtiveram diferenças numa primeira aproximação entre as necessidades nominais de aquecimento ( $N_{ic}$ ) de cálculo e as medidas experimentalmente, foi investigado o efeito da radiação solar nas paredes. A partir do valor da radiação incidente nas fachadas, realizou-se uma análise de condução de calor em regime dinâmico, utilizando como base o método de diferenças finitas (subcapítulo 5.5). A radiação solar foi adaptada como fonte externa de calor que incide nas diferentes fachadas tendo sido considerado o coeficiente de absorção a Noroeste de 0,8 (cor escura) e a Sudeste de 0,5 (cor média) (Quadro V.5 RCCTE [2]).

A contribuição dos ganhos solares pelas paredes de fachada com orientação a Noroeste e Sudeste, foram determinados a partir da equação (6.9), e os resultados são apresentados graficamente na Figura 6.5.

$$Ganhos\ Solares = U \cdot A \cdot GD - \frac{\sum T_{si} - T_i}{R} \cdot A \quad 6.9$$

Em que  $U$  representa o coeficiente de transmissão térmica ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ );  $A$  a área do elemento ( $m^2$ );  $GD$  o número de graus dia de ensaio ( $^\circ C \cdot dia$ );  $T_{si}$  e  $T_i$  a temperatura superficial e ambiente respectivamente ( $^\circ C$ ), e  $R$  a resistência térmica da parede ( $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ ).

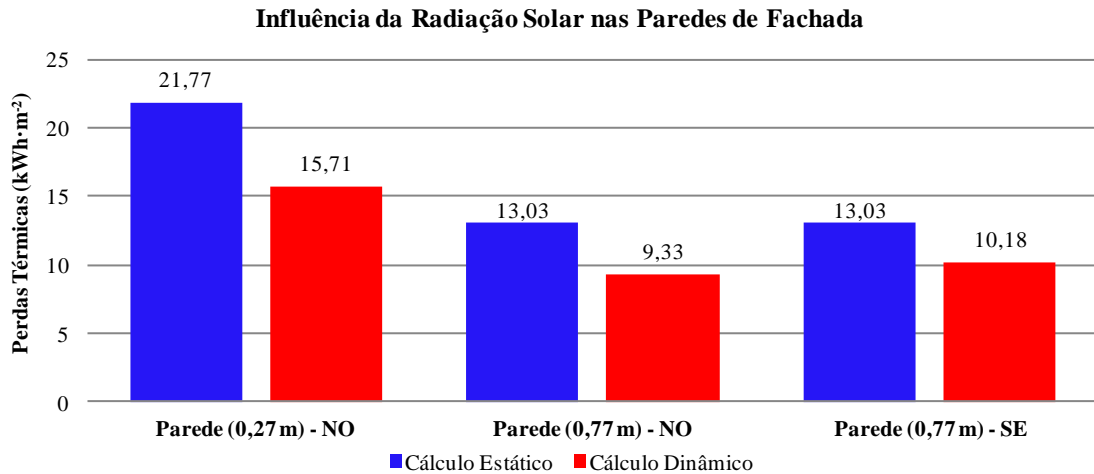


Figura 6.5 - Gráfico da influência da radiação solar nas paredes de fachada (NO e SE)

Os resultados obtidos para os ganhos solares das paredes com a aplicação do método dinâmico, traduziu-se numa diferença entre as perdas térmicas calculadas através do processo em regime permanente e em regime dinâmico para as fachadas Sudeste e Noroeste. As diferenças registadas são apresentadas no Quadro 6.8.

Quadro 6.8 - Ganhos solares pelas paredes de fachada (NO e SE)

Regime	Paredes			Unid.
	0,77 m		0,27 m	
	SE	NO	NO	
<b>Permanente</b>	13,03	13,03	21,77	kWh·m <sup>-2</sup>
<b>Dinâmico</b>	10,18	9,33	15,71	
<b>Diferença</b>	2,85	3,70	6,06	

Estes valores foram considerados para todas as paredes independentemente de possuírem ou não azulejo cerâmico, uma vez que para efeito da contribuição solar os valores que resultam do cálculo dinâmico são iguais para ambos os casos. De referir que a Sudeste existe uma diferença menor, visto que a fachada é fortemente sombreada no que diz respeito à transmissão solar directa, mas também à transmissão difusa e reflectida, minimizando assim os ganhos obtidos.

Com estes valores de ganhos térmico solares, determinou-se um coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) através da equação (6.10) associados às paredes  $U - U_{solar}$ , que corresponde a uma redução de 21% no que diz respeito às perdas de calor pela envolvente exterior. Foi também considerado que este efeito terá também influência nas pontes térmicas lineares calculadas, sendo o valor reduzido na mesma proporção percentual das perdas pela envolvente exterior.

$$U_{solar} = \frac{\text{Ganhos Solares da Parede}}{0,024 \cdot GD} \quad 6.10$$

No Quadro 6.9 apresenta-se o valor do coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) referente ao sol ( $U_{solar}$ ) e com o efeito dos ganhos solares ( $U_{ensaio}-U_{solar}$ ). É também apresentado a influência nas perdas pela envolvente opaca e pontes térmicas lineares.

Quadro 6.9 - Efeito do sol nas perdas térmicas da envolvente exterior

Orientação	SE			NO			Saguão			-	
	Parede 0,77m	Parede 0,775m	Cant.	Parede 0,775m	Parede 0,275m	Cant.	Parede 0,74m	Parede 0,27m	Cant.		P.T.L
	RR	RI		RE	RE		RR	RR			
Dimensão	10,07	5,67	0,82	11,05	1,32	1,08	3,17	1,32	0,26	-	
$U_{solar}$	0,27	0,27	0,27	0,35	0,57	0,57	1,20	1,89	1,32	-	
$U_{ensaio}-U_{solar}$	0,96	0,95	1,12	0,87	1,46	0,82	1,20	1,89	1,32	-	
Perdas ( $W \cdot ^\circ C^{-1}$ )	35,11									25,10	
Perdas (kWh)	375,18									268,20	

RE - Revestimento exterior de azulejo cerâmico e interior de reboco

RI - Revestimento interior de azulejo cerâmico e exterior de reboco

RR - Revestimento exterior e interior de reboco

### 6.1.7. Necessidades Térmicas de Aquecimento

Determinadas todas as parcelas da equação (6.1) referentes às principais fontes de perdas e ganhos de calor brutos associados à habitação estudada, pode agora ser realizado o seu balanço térmico com vista à determinação do factor de utilização dos ganhos de calor ( $\eta$ ) com base no modelo de regime estacionário ISO 13790 [3] e RCCTE [2].

Os valores que contribuem para o consumo de energia eléctrica já determinados, são apresentados no Quadro 6.10 síntese de resultados, perspectivando as necessidades brutas de aquecimento para a habitação estudada.

Quadro 6.10 – Necessidade Brutas de Aquecimento - Piso 2

Necessidades Brutas de Aquecimento - Piso 2		
Envolvente Exterior	643,40	kWh
Envolvente Interior	623,95	kWh
Vãos Envidraçados	574,05	kWh
Renovação de Ar	1151,33	kWh
$\Sigma$ Necessidades Brutas de Aquecimento	2992,73	kWh

Do somatório das necessidades brutas de aquecimento, resulta um valor de 2992,73 kWh, este valor constitui os gastos de energia necessários para manter a habitação aquecida devendo ainda ser subtraída a parcela relativa aos ganhos úteis de calor pelos envidraçados. Foi determinado experimentalmente que o total dos ganhos térmicos brutos pelos envidraçados nas fachadas é de 314,21 kWh, de modo a determinar o seu valor útil deverá ser utilizada a seguinte equação:

$$Ganhos \acute{U}teis = \eta \cdot (GSE \cdot A_w + GNO \cdot A_w) \quad 6.11$$

Efectuando um balanço térmico do edifício no período de ensaio, é estimada uma relação entre ganhos e perdas térmicas através da equação (6.12), de onde resulta  $\gamma = 0,10$ .

$$\gamma = \frac{Ganhos \acute{T}ermicos \text{ Brutos}}{Nec. \text{ Brutas de Aquecimento}} \quad 6.12$$

O factor de utilização dos ganhos térmicos é função da classe da inércia térmica do edifício, determinada no subcapítulo 3.3, e da relação entre os ganhos totais brutos e as perdas totais térmicas do edifício ( $\gamma$ ), conforme apresentado na seguinte equação:

$$\eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} \quad 6.13$$

Onde o coeficiente ( $a$ ) toma o valor de 4,2 (RCCTE) admitido para edifícios com inércia térmica forte. O valor que resulta deste cálculo é  $\eta = 1$ , devido essencialmente às elevadas perdas térmicas do edifício comparativamente aos ganhos, sendo por isso contabilizados a totalidade dos ganhos pelos vãos envidraçados conforme a equação (6.11), ou seja, 314,21 kWh.

Finalmente, para a habitação estudada, resultante das perdas e ganhos de calor pela envolvente vertical da habitação, os gastos de energia para aquecimento são de 2678,52 kWh para o período de ensaio. Da equação 6.1, resultam necessidades nominais de aquecimento de 35,50 kWh·m<sup>-2</sup>.

## 6.2. Validação do Modelo Térmico

O modelo térmico da habitação consiste na determinação experimental da energia eléctrica necessária para aquecimento da habitação, cujo objectivo passa por manter uma temperatura constante durante um determinado período de tempo e comparar os resultados com os calculados através dos modelos de cálculo em regime estacionário. Dos resultados experimentais obtidos com o método do aquecimento e das necessidades energéticas de aquecimento obtidas através do modelo de regime estacionário EN ISO 13790 [3] e RCCTE [2], os resultados finais são os apresentados no Quadro 6.11.

Quadro 6.11 - Validação do modelo térmico da habitação

Método Experimental	Modelo de Regime Estacionário
2504,40 kWh	2678,52 kWh

Comparando o valor experimental e o resultante de cálculo, obtém-se uma diferença de aproximadamente 175 kWh, que percentualmente corresponde a um desvio de 6,5%, validando assim o modelo térmico desenvolvido para a habitação do “Gaioleiro”. O desvio apresentado face

às incertezas dos equipamentos e considerando que as condições de ensaio nunca são totalmente controláveis, apresenta-se como um valor baixo que dá confiança aos resultados que foram determinados experimentalmente bem como aos métodos utilizados para estimar particularidades mais sensíveis do processo. A validação do modelo térmico da habitação é resultado de um conjunto de factores que devem ser analisados e destacados.

Um dos factores que contribuiu para a obtenção dos resultados prende-se com a determinação experimental da capacidade de isolamento térmico efectivo da envolvente opaca vertical, com a determinação das resistências térmicas e condutibilidades térmicas equivalentes das paredes. A partir dos resultados experimentais, obteve-se valores de  $\lambda_{eq,parede1} = 1,38 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$  e  $\lambda_{eq,parede2} = 1,17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$  para as paredes de elevada e reduzida espessura respectivamente, contrariando assim os valores propostos no ITE54 [5] que prevê uma  $\lambda_{eq,parede} = 1,76 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$  para o tipo de paredes da habitação, tendo sido assim obtidos valores que vão de certa forma reduzir as perdas térmicas para o exterior.

Dadas as alterações promovidas na habitação ao nível da temperatura, destaca-se também o cálculo efectuado no âmbito das resistências térmicas superficiais, determinando assim a resposta superficial da parede no interior e no exterior mediante as condições dos ambientes e com isso calcular os coeficientes de transmissão térmica que correspondessem ao real comportamento dos elementos opacos. As resistências térmicas superficiais foram assim alteradas em 40% ( $R_{si}$ ) e em 50% ( $R_{se}$ ), dependente das condições a que estava sujeito e do local do elemento.

Da análise dos resultados destaca-se ainda o efeito do sol nos vãos envidraçados e nas paredes de fachada, uma vez que esta situação contribuiu de um modo decisivo para o resultado final obtido e a posterior validação do modelo térmico. Na prática, a determinação deste efeito nas paredes resultou numa redução de cerca de 21% das perdas térmicas gerais pela envolvente em contacto com o exterior. Nos vãos envidraçados a contribuição do sol foi de 314,21 kWh, que permitiu baixar o consumo eléctrico em cerca de 10% e assim reduzir as necessidades térmicas brutas de aquecimento. Para este resultado contribuiu ainda a inércia forte subjacente ao edifício, resultado do contributo das paredes da envolvente com uma espessura bastante elevada e com uma forte capacidade de retenção de calor.

O modelo térmico a que foi sujeita a habitação permite face a um regime estacionário, avaliar a transmissão e o comportamento térmico deste tipo de edificado com paredes de elevada inércia térmica num clima considerado ameno como é o de Lisboa, o modelo térmico poderá constituir uma ferramenta experimental de aferição das necessidades térmicas de edifícios com características próximas do edificado “Gaioleiro”.

## 7. APRECIACÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA HABITAÇÃO

### 7.1. Aspectos Gerais

No capítulo 6 foi desenvolvido o modelo de simulação térmica e o mesmo foi validado para as condições referentes às condições de ensaio. No subcapítulo 7.2 apresenta-se o modelo e os resultados referentes à determinação das necessidades nominais de aquecimento e de arrefecimento de acordo com a metodologia do RCCTE [2]. No subcapítulo 7.3 serão avaliadas oportunidades de melhoria a aplicar à habitação estudada e o impacto das medidas adoptadas no desempenho térmico do edifício, bem como a determinação do custo máximo do investimento, face às poupanças energéticas, com base num período de retorno de 8 anos.

Tendo em conta os parâmetros de qualidade indicados na secção 2.2.1, verifica-se que as medidas de isolamento térmico das paredes, a substituição dos vãos envidraçados e o controlo da ventilação previstos, permitem satisfazer as exigências qualitativas presentes no RCCTE [2] que constituem requisitos para a eficiência energética de uma habitação.

### 7.2. Apreciação do Comportamento Térmico da Habitação face ao RCCTE

#### 7.2.1. Descrição dos Casos Avaliados

Nesta secção realiza-se uma aplicação do RCCTE [2] à habitação objecto de estudo com o objectivo de avaliar a satisfação dos requisitos aplicáveis aos edifícios novos, bem como identificar eventuais oportunidades de melhoria da metodologia regulamentar face aos valores mais precisos determinados no âmbito deste trabalho. Para esse efeito a determinação das necessidades de aquecimento ( $N_{ic}$ ) e as necessidades de arrefecimento ( $N_{vc}$ ) são efectuadas para duas situações:

- e) são utilizados os valores convencionais (ITE54 [5], ITE50 [52] e RCCTE [2]) para os coeficientes de transmissão térmica e pontes térmicas lineares. Estes resultados são designados por  $N_{ic}$  – valores convencionais e  $N_{vc}$  – valores convencionais, e
- f) são utilizados os valores mais precisos, determinados neste trabalho para o  $U$  das paredes e pontes térmicas lineares e o efeito do sol nas fachadas. Estes resultados são designados por  $N_{ic}$  – ensaio e  $N_{vc}$  – ensaio.

### 7.2.2. Método de Cálculo de $N_{ic}$ e Delimitação da Habitação

Segundo o RCCTE [2], as necessidades nominais de aquecimento de uma habitação autónoma de um edifício pode ser definida como a energia útil que é necessário fornecer-lhe para manter permanentemente no seu interior, a uma temperatura de referência definida no seu Artigo 14.º que corresponde a 20 °C durante toda a estação convencional de aquecimento. As necessidades nominais de aquecimento resultam da soma algébrica de três parcelas:

- perdas de calor por condução através da envolvente,  $Q_t$ ;
- perdas de calor resultantes da renovação de ar,  $Q_v$ , e
- ganhos de calor úteis  $Q_{gu}$ , resultantes da iluminação, dos equipamentos, dos ocupantes e dos ganhos solares através dos envidraçados.

Da conjugação destes elementos divididos pela área útil de pavimento da habitação, resulta as necessidades nominais de aquecimento anuais para a estação de aquecimento ( $N_{ic}$ ), dados pela equação (7.1).

$$N_{ic} = \frac{Q_t + Q_v + Q_{gu}}{A_p} \quad 7.1$$

No estudo da habitação não se consideram as perdas pela cobertura (tecto) e pelo pavimento, uma vez que se trata de um piso intermédio e as habitações adjacentes terão previsivelmente o mesmo uso e consequentemente um regime de temperaturas semelhante. Como se pode verificar através dos resultados das medições da temperatura interior nos dias 07-05-2011 a 18-05-2011, em que as casas não estavam dotadas de sistemas de aquecimento, o regime de temperaturas é semelhante (anexo C).

Relativamente aos edifícios adjacentes, por serem de habitação não se consideraram perdas térmicas para os mesmos. Durante o período experimental sem aquecimento, a temperatura da habitação do edifício adjacente é próxima da habitação estudada, neste caso é 1 °C superior à da habitação estudada (anexo C) devido à maior exposição desta habitação. Esta opção é justificada em termos regulamentares com base na norma europeia EN ISO 13789 [58].

Ao nível do zonamento climático onde está inserido o edifício, o mesmo já foi anteriormente abordado no subcapítulo 3.2 do presente trabalho, sendo no âmbito da análise de Inverno importante reforçar que a duração é de 5,3 meses e o número de graus dia é de 1190 °C·dia.

Na Figura 7.1, encontra-se delimitada a envolvente da habitação considerada na determinação das perdas e ganhos de calor.

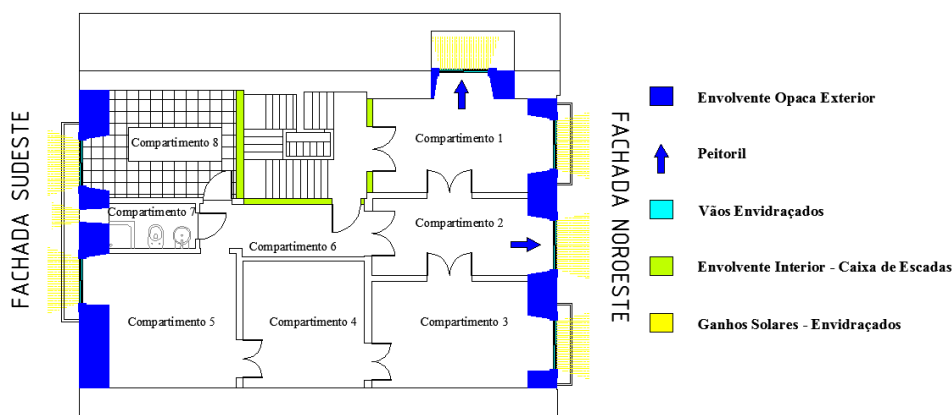


Figura 7.1 - Perdas e Ganhos de calor pelas envolventes consideradas ( $N_{ic}$ )

### 7.2.2.1. Perdas por Renovação do Ar Interior

Uma vez que o edifício tem ventilação natural e não cumpre a norma NP 1037-1 [59], para avaliar as perdas térmicas por ventilação (equação 6.2) para as condições de referência e de ensaio, serão adoptados os valores do número de renovações horárias ( $Rph$ ) indicados no Quadro IV.1 do RCCTE [2]. Tendo em conta a localização do edifício e a sua constituição são relevantes os seguintes aspectos:

- classe 1 de exposição ao vento, pois o edifício situa-se no interior de uma zona urbana (rugosidade D), na região A e a habitação estudada tem uma cota menor a 10 m;
- não existem dispositivos de admissão de ar na fachada;
- as caixilharias não possuem classificação;
- a área dos vãos envidraçados ( $17,16 \text{ m}^2$ ) superior a 15% da área útil de pavimento ( $11,31 \text{ m}^2$ );
- inexistência de caixas de estore, e
- porta de patamar sem vedante.

Para estas condições, do Quadro IV.1 do RCCTE [2] é obtida uma taxa de renovação do ar de  $1,0 \text{ h}^{-1}$ . Através da equação 6.2, foi determinada a quantidade de energia necessária para compensar as perdas por ventilação na estação de aquecimento, sendo o seu valor de 2198 kWh.

### 7.2.2.2. Perdas Superficiais pela Envolvente Exterior

Serão estudados no âmbito das perdas pela envolvente exterior, as referentes às paredes em contacto com o exterior e vãos envidraçados. No que diz respeito às paredes em contacto com o exterior, foi obtido um valor experimental para a condutibilidade térmica dos elementos (ver subcapítulo 5.2), onde se estabeleceu condutibilidades para as paredes de maior e menor espessura de  $1,38$  e  $1,17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$  respectivamente. O valor indicado no ITE54 [5] apenas contempla o comportamento térmico da parede sem revestimentos adicionais ( $1,76 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ),

pelo que se considerou uma camada de reboco em cada face (interior e exterior) com 0,025 m de argamassa de cal e areia, para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica.

As características dos vãos envidraçados já foram anteriormente abordadas (ver secção 6.1.3), no entanto, estabeleceu-se que o vão envidraçado relativo ao saguão possui a portada de madeira activa, tendo sido considerado que as mesmas têm elevada permeabilidade ao ar e como tal o coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite ( $U_{\text{wdn}}$ ) adoptado é de  $3,90 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$  [52].

As perdas térmicas pelas paredes e vãos envidraçados têm por base as resistências térmicas superficiais de referência ( $R_{\text{si}} = 0,13 \text{ m}^2\cdot\text{°C}\cdot\text{W}^{-1}$  e  $R_{\text{se}} = 0,04 \text{ m}^2\cdot\text{°C}\cdot\text{W}^{-1}$ ) visto terem sido admitidos os valores convencionais disposto no RCCTE [2] para as soluções base.

Os cálculos para as perdas térmicas (kWh) foram realizados conforme a equação (6.4) para os elementos opacos e vãos envidraçados e os resultados apresentados no Quadro 7.1. Os cálculos referentes aos coeficientes de transmissão térmica a  $20 \text{ °C}$ , podem ser consultados no anexo E.

Quadro 7.1 - Perdas térmicas pela envolvente exterior ( $N_{\text{ic}}$ )

Orientação	Paredes								Vãos Envidraçados				
	SE		NO		SE/NO	Saguão			NO		SE		Saguão
	Parede 0,77m	Parede 0,775m	Parede 0,775m	Parede 0,275m	Cantaria	Parede 0,74m	Parede 0,27m	Cantaria	Sacada	Peitoril	Sacada	WC	Peitoril
RR	RI	RE	RE		RR	RR							
Dimensão ( $\text{m}^2$ )	10,07	5,67	11,05	1,32	1,90	3,17	1,32	0,26	3,32	2,15	3,06	0,12	2,15
$U_{\text{ensaio}}$	1,38	1,37	1,37	2,48	1,59	1,42	2,50	1,59	4,38	4,94	4,38	5,81	3,90
Perdas ( $\text{W}\cdot\text{°C}^{-1}$ )	51,30								77,67				
Perdas (kWh)	1465,00								2218,34				
$U_{\text{referência}}$	1,56	1,55	1,55	2,77	1,59	1,60	2,08	1,59	4,38	4,94	4,38	5,81	3,90
Perdas ( $\text{W}\cdot\text{°C}^{-1}$ )	57,46								77,67				
Perdas (kWh)	1641,06								2218,34				

RE - Revestimento exterior de azulejo cerâmico e interior de reboco

RI - Revestimento interior de azulejo cerâmico e exterior de reboco

RR - Revestimento exterior e interior de reboco

Da análise do quadro constata-se desde logo a diferença existente entre as perdas térmicas associadas ao cálculo com valores de ensaio face aos convencionais, este facto diz respeito às distintas condutibilidades térmicas equivalentes associadas a cada método. Em termos práticos, a diferença existente é de  $6,16 \text{ W}/\text{°C}$  o que equivale a uma poupança de energia de  $176,06 \text{ kWh}$  no final da estação de Inverno representando assim uma diferença de 11% face aos valores convencionais. Esta diferença poderia traduzir-se num valor bem mais significativo na avaliação final das perdas térmicas superficiais de um edifício, mediante uma área em contacto com o exterior superior à que é estabelecida no presente caso, com a consequência do aumento do factor de forma (FF) evidenciando assim a contribuição da aplicação dos valores mais precisos para as condutibilidades térmicas equivalentes de ensaio para a envolvente opaca. Nesta perspectiva,

estabelece-se ainda para o caso de estudo que existem perdas de pelo menos 5 kWh por cada 1 m<sup>2</sup> de parede durante o período de aquecimento.

Para as perdas térmicas pelos vãos envidraçados obteve-se o mesmo resultado nas duas situações, uma vez que o processo de cálculo dos coeficientes de transmissão térmica, bem como os materiais e percentagem de caixilho e envidraçados considerados para os vãos são iguais.

### 7.2.2.3. Perdas por Pontes Térmicas

À semelhança do que já havia acontecido, o cálculo das pontes térmicas lineares para os valores de ensaio foi realizado a partir de uma análise bidimensional, a metodologia de análise e considerações relacionadas com o *software Therm* já foram anteriormente abordadas, pelo que se mantêm no âmbito desta verificação. A análise processou-se igualmente em 3 níveis, foram ainda determinadas as perdas lineares pelas vergas das janelas, ligação do pavimento com paredes e varandas. Os resultados provenientes da análise bidimensional realizada para os valores de ensaio das perdas por pontes térmicas lineares são apresentados no Quadro 7.2.

Quadro 7.2 – Perdas pela envolvente em contacto com o exterior (análise bidimensional)

	Nível 1 (0,90 m)	Nível 2 (1,65 m)	Nível 3 (0,45 m)	Parede Janela	Pavimento Parede Espessa	Pavimento Parede Fina	Pavimento Varanda
h (m)	0,90	1,65	0,45	-	-	-	-
L (m)	19,46	17,47	17,52	7,60	10,32	2,94	21,62
U (W·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	1,45	1,37	1,21	-	-	-	-
Perdas (W·°C <sup>-1</sup> )	25,44	39,46	9,54	3,13	0,97	1,26	2,98

Da análise bidimensional resultam perdas totais de 82,8 W·°C<sup>-1</sup> para a habitação estudada pelas paredes em contacto com o exterior. As pontes térmicas lineares resultam da diferença entre as perdas pelas zonas correntes em contacto com o exterior e as perdas globais determinadas através da análise bidimensional (Quadro 7.3), que corresponde assim a um gasto de energia de 899,3 kWh para o período de aquecimento.

Quadro 7.3 - Pontes térmicas lineares (Valores de ensaio)

Σ A·U (Zona Corrente)	51,30	W·°C <sup>-1</sup>
Perdas Globais ( <i>Therm</i> )	82,80	
P.T.L ( <i>Lpt</i> ).	31,50	

No caso da análise realizada com os valores convencionais, a opção será cumprir o estipulado no RCCTE [2] para as diversas opções apresentadas no regulamento, considerando os coeficientes de transmissão térmica lineares de referência. Assim sendo, durante toda a estação de aquecimento a energia necessária para compensar as perdas térmicas lineares é dada pela equação (6.5), sendo neste caso a parcela relativa ao cálculo do coeficiente  $L_{pt}$  (W·m<sup>-1</sup>) dado por:

$$L_{pt} = \sum \Psi_j \cdot B_j \quad 7.2$$

Em que  $\psi_j$  representa o coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica  $j$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ), e  $B_j$  o desenvolvimento linear da ponte térmica  $j$ , medido pelo interior (m).

Pelo facto das paredes do edifício não possuírem qualquer tipo de isolamento térmico na sua constituição, considerou-se de acordo com o regulamento, que os valores dos coeficientes de transmissão térmica linear adoptados são relativos às soluções de “*Isolamento repartido ou isolante na caixa-de-ar de paredes duplas*”.

Devido à elevada espessura das paredes é expectável a existência de pontes térmicas lineares nas zonas de descontinuidade destes elementos em contacto com os vãos envidraçados (já analisado anteriormente e demonstrado na Figura 6.3). O fluxo que atravessa as faces laterais das paredes assume, em grande parte, um carácter bidimensional que constitui uma ponte térmica linear com uma preponderância importante para a determinação das perdas de energia e como tal utilizou-se o valor convencional de  $\psi = 0,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , indicado no RCCTE [2] para situações que não são consideradas nos quadros do referido regulamento.

Para a ligação entre duas paredes verticais, trata-se de quantificar a ponte térmica linear entre a junção das paredes que delimitam o edifício e que estão em contacto directo com edifícios adjacentes. Nesta situação específica o regulamento prevê o valor de  $0,20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  (Tabela Fr, RCCTE [2]) para o coeficiente de transmissão térmica linear o qual foi considerado.

Para a situação das perdas na ligação da fachada com pavimentos intermédios, foi tomado em consideração que os pavimentos de ambos os pisos possuem 0,25 m de espessura. Deste modo, o regulamento prevê que possa ser utilizado um coeficiente de perdas de  $0,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  (Tabela Cr, RCCTE [2]). Relativamente à ligação da fachada com varanda, foi considerado um coeficiente de perdas térmicas lineares de  $\psi = 0,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ . Por fim, a ligação da fachada com as vergas e ombreiras das janelas, foi sido considerado o valor conservativo do RCCTE [2] para situações onde o isolamento térmico não contacta com a caixilharia,  $\psi = 0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ . Em seguida apresenta-se no Quadro 7.4 uma síntese das pontes térmicas lineares estudadas.

Quadro 7.4 - Pontes térmicas lineares (valores convencionais)

<b>PTL - Pontes Térmicas Lineares</b>				
<b>Elemento</b>	<b>Local do Isolamento</b>	<b><math>B_j</math> (m)</b>	<b><math>\Psi_j</math> (<math>\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}</math>)</b>	<b><math>B_j \cdot \Psi_j</math> (<math>\text{W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}</math>)</b>
Faces laterais	Repartido	30,6	0,50	15,3
Ligação Paredes Verticais	Repartido	12,0	0,20	2,4
Fachada c/ Varanda	Repartido	21,6	0,40	8,7
Fachada c/ Verga+Ombreira	Repartido	30,8	0,20	6,2
Fachada c/ Pavimento	Repartido	13,3	0,25	3,3

Após a análise de todas as pontes térmicas lineares e procedendo à soma conjunta das mesmas, obtêm-se perdas totais de  $35,82 \text{ W}\cdot\text{°C}^{-1}$ , o correspondente de acordo com a equação (6.5) a um gasto anual de 1023 kWh. O valor estimado para esta situação de cálculo, é superior em cerca de 123,64 kWh (12%) face ao valor que resulta da análise bidimensional via *software Therm*. O que associa de certa forma a utilização dos valores de referência a uma majoração das necessidades térmicas de aquecimento da habitação.

#### 7.2.2.4. Perdas pela Envolvente Interior

As perdas de calor que ocorrem pelas paredes interiores são relativas às perdas correntes entre espaço não aquecido e dizem respeito às paredes de separação da habitação com a caixa de escadas. Foi calculado o valor do coeficiente  $\tau$  associado, determinado pelo rácio entre a área dos elementos que separa o espaço útil interior, do espaço não útil ( $A_i$ ) e a área que separa o espaço não útil do ambiente exterior ( $A_u$ ).

Desta forma foi determinado para a caixa de escadas um  $A_i = 128,84 \text{ m}^2$  correspondentes às áreas dos 3 pisos, uma vez que é totalmente envolvida por espaços úteis. A exceção é feita no tecto e na entrada do edifício onde a fachada de entrada e as paredes laterais estão em contacto com o exterior, saguão e com um espaço comercial (que se considera exterior), onde o  $A_u = 38 \text{ m}^2$ . Da relação entre  $A_i/A_u$ , resulta um valor entre 1 e 10, recorrendo à Tabela IV.1 do RCCTE [2], o valor de  $\tau$  é 0,5 correspondente a uma zona de circulação comum, com aberturas permanentes/volume total  $< 0,05 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-3}$ , devido à existência de uma grelha para entrada de ar no cimo da porta de entrada que tem uma dimensão próxima de  $1 \text{ m}^2$ . Para as resistências térmicas superficiais interiores e exteriores, adoptou-se o valor de  $0,13 \text{ m}^2\cdot\text{°C}\cdot\text{W}^{-1}$ .

Quadro 7.5 - Perdas térmicas pela envolvente interior ( $N_{ic}$ )

Orientação Informação	Caixa de Escadas		
	Parede Frontal 0,20 m	Parede Tabique 0,15 m	Portas
Dimensão ( $\text{m}^2$ )	8,55	12,72	5,96
$U_{\text{ensaio}} (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1})$	2,32	1,49	2,07
Perdas ( $\text{W}\cdot\text{°C}^{-1}$ )	25,61		
Perdas (kWh)	731,42		
$U_{\text{convencionais}} (\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{°C})$	2,45	1,49	2,07
Perdas ( $\text{W}\cdot\text{°C}^{-1}$ )	26,16		
Perdas (kWh)	747,13		

#### 7.2.2.5. Ganhos na Estação de Aquecimento

Os ganhos brutos na estação de aquecimento segundo a metodologia de cálculo do RCCTE [2], são relativos à radiação solar que incide nos vãos envidraçados e também dos ganhos internos que resultam da ocupação do edifício.

Para o caso específico da habitação estudada, foram considerados os ganhos solares úteis pelos envidraçados nas fachadas Noroeste e Sudeste, nas janelas de sacada, de peitoril, na janela referente ao compartimento 7 (casa de banho) e janela de peitoril relativa ao saguão. Existem no entanto algumas considerações relativamente à janela do compartimento 7 e de peitoril do saguão, a primeira encontra-se coincidente com o paramento interior da habitação existindo uma abertura na parede que promove a entrada de radiação solar difusa, o mesmo acontece no saguão, que devido à profundidade da janela (no saguão) apenas se considerou o contributo da radiação difusa. Nestes casos específicos considerou-se o factor de obstrução máximo ( $F_s = 0,27$ ), previsto no regulamento para as orientações a Norte.

O método pelo qual é determinado os ganhos úteis pelos envidraçados corresponde ao método detalhado previsto no Anexo IV do RCCTE [2], no ponto 4.3.1.1 e a equação é dada por:

$$Ganhos\ Envidraçados = G_{sul} \cdot \sum_j \left[ X_j \cdot \sum A_{snj} \right] \cdot M \quad 7.3$$

Em que  $G_{sul}$  representa o valor médio mensal da energia sola média incidente numa superfície vertical orientada a Sul de área unitária durante a estação de aquecimento ( $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mês}^{-1}$ );  $X_j$  o factor de orientação para as diferentes exposições;  $A_{snj}$  é a área efectiva colectora da radiação solar da superfície  $n$  que tem orientação  $j$  ( $\text{m}^2$ );  $j$  o índice que corresponde a cada uma das orientações;  $N$  o índice que corresponde a cada uma das superfícies com a orientação  $j$ , e  $M$  a duração da estação de aquecimento, em meses.

Como já foi anteriormente referido na caracterização térmica da localização do edifício, a cidade de Lisboa pertence à zona climática de II com 5,3 meses de Inverno e portanto com uma energia solar média mensal de  $108$  ( $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

O cálculo da área efectiva de envidraçado capaz de captar radiação solar é realizado por grupos de vãos com características idênticas de protecção solar, a partir da seguinte equação:

$$A_s = A \cdot F_s \cdot F_g \cdot F_w \cdot g_{\perp} \quad 7.4$$

Em que  $A$  representa a área do vão envidraçado ( $\text{m}^2$ );  $F_s$  o factor de obstrução obtido através do produto dos factores do horizonte ( $F_h$ ), elementos horizontais ( $F_o$ ) e por elementos verticais ( $F_f$ );  $F_g$  a fracção envidraçada;  $F_w$  o factor de correcção das propriedades do vidro, e  $g_{\perp}$  o factor solar do vão envidraçado para a radiação incidente, que toma o valor de  $0,70$  devido à utilização de uma cortina muito transparente. O valor dos factores que determinam o factor de obstrução ( $F_s$ ) de cada elemento pode ser consultado no anexo G.

A área efectiva foi calculada de acordo com a equação (7.4) para cada vão envidraçado e os resultados são apresentados em seguida no Quadro 7.6.

Quadro 7.6 – Cálculo da área efectiva de envidraçado ( $N_{ic}$ )

Referência Vão	Tipo de Vidro	Área (m <sup>2</sup> )	Factor de Orientação (Xj)	Factor Solar do Vidro (g <sup>±</sup> )	Factor de Obstrução (Fs)	Habitação Envidraçada (Fg)	Factor de Sel. Angular (Fw)	Área Efectiva (m <sup>2</sup> )
Sacada_1_NO	Simples	3,32	0,33	0,70	0,78	0,50	0,90	0,81
Sacada_2_NO	Simples	3,32	0,33	0,70	0,78	0,50	0,90	0,81
Peitoril_1_NO	Simples	2,15	0,33	0,70	0,78	0,70	0,90	0,73
Sacada_1_SE	Simples	3,06	0,84	0,70	0,73	0,50	0,90	0,70
Sacada_2_SE	Simples	3,06	0,84	0,70	0,54	0,50	0,90	0,52
WC_SE	Simples	0,12	0,84	0,70	0,27	0,70	0,90	0,01
Peitoril_2_Sag.	Simples	2,15	0,84	0,70	0,27	0,70	0,90	0,26
Total =								3,84

Depois de determinada área efectiva de envidraçados e utilizando a equação (7.3), resultam ganhos solares brutos de 1161 kWh·ano<sup>-1</sup> nos 5,3 meses associados ao Inverno de Lisboa.

Determinados que estão os ganhos solares pelos envidraçados, interessa agora determinar os ganhos de calor de fontes internas durante toda a estação de aquecimento. De acordo com o regulamento, o edifício para efeitos de ganhos de calor relativos aos equipamentos internos, é considerado como sendo edifício residencial estimando-se assim o seu valor de acordo com a seguinte equação:

$$Ganhos\ Internos = q_i \cdot M \cdot A_p \cdot 0,72 \quad 7.5$$

Em que  $q_i$  representa os ganhos internos médios por unidade de área útil de pavimento, numa base de 24 h, todos os dias do ano, no caso dos edifícios residenciais toma o valor de 4 W·m<sup>-2</sup>, (Quadro IV.3, RCCTE [2]);  $M$  é a duração média da estação convencional de aquecimento em meses, e  $A_p$  a área útil de pavimento (m<sup>2</sup>).

Do cálculo realizado resulta um valor de ganhos internos brutos de 1152 kWh·ano<sup>-1</sup>. Os ganhos totais brutos na estação de aquecimento resultam da soma entre os ganhos solares e internos igual a 2312 kWh, este valor enquadra-se para ambas as situações de cálculo (ensaio e valores convencionais).

#### 7.2.2.6. Necessidades Nominais de Aquecimento - $N_{ic}$

Os parâmetros calculados a partir dos valores de ensaio e os valores convencionais, contribuíram para determinar as perdas e ganhos relativos à habitação estudada. Com vista à determinação das necessidades nominais de aquecimento para ambos os casos de estudo, segue-se no Quadro 7.7 uma síntese dos valores resultantes dos cálculos efectuados para as perdas térmicas e dos ganhos de calor associados à habitação estudada para o período de aquecimento.

Quadro 7.7 – Balanço térmico da habitação ( $N_{ic}$ )

<b>Perdas Térmicas Associada a:</b>	<b>Val. Ensaio</b>	<b>Val. Convencionais</b>	<b>Unid.</b>
Envolvente Exterior	2364,33	2664,29	kWh
Envolvente Interior	731,50	747,19	kWh
Vãos Envidraçados	2154,79	2154,79	kWh
Renovação de Ar	2197,95	2197,95	kWh
$\Sigma$ Necessidades Brutas de Aq.	7448,58	7764,22	kWh
Ganhos Brutos de Calor	2312,28	2312,28	kWh

Efectuando o balanço térmico do edifício para o período de aquecimento, foram estimadas as relações entre os ganhos e as perdas térmicas para ambos os casos através da equação (6.12) resultando valores de  $\gamma = 0,31$  para o caso do ensaio e  $\gamma = 0,30$  para os valores convencionais.

Desta relação, é calculado o factor de utilização dos ganhos térmicos através da equação (6.13) sabendo que a inércia do edifício é forte, resultam valores de  $\eta$  muito próximos de 1,0 para ambas as situações ainda que diferentes, devido às maiores perdas que se fazem sentir para os valores convencionais. Daqui resultam ganhos solares úteis de 2300,53 kWh para os valores de ensaio e de 2302,24 kWh para valores convencionais.

A partir da equação (7.1) do cálculo das necessidades nominais de aquecimento ( $N_{ic}$ ), foram obtidos os seguintes valores para os diferentes métodos de cálculo:

Quadro 7.8 - Necessidades nominais de aquecimento ( $N_{ic}$ )

<b><math>N_{ic}</math> - Val. Ensaio</b>	<b><math>N_{ic}</math> - Val. Convencionais</b>
68,23 kWh·m <sup>-2</sup> ·ano <sup>-1</sup>	72,39 kWh·m <sup>-2</sup> ·ano <sup>-1</sup>

Pela determinação dos valores das necessidades nominais de aquecimento, a diferença estabelecida entre ambas as situações é de 6%, devido unicamente à contribuição da determinação experimental das características térmicas das paredes e análise bidimensional das pontes térmicas lineares.

Numa perspectiva de aferir se as necessidades nominais calculadas se adaptam aos limites máximos do regulamento, foram calculadas as necessidades nominais máximas de aquecimento ( $N_i$ ). Este valor depende desde logo do factor de forma ( $FF$ ) que resulta do quociente entre o somatório das áreas da envolvente exterior (34,77 m<sup>2</sup>) e interior (27,23 m<sup>2</sup>) da habitação e o respectivo volume interior (226,35 m<sup>3</sup>) correspondente, conforme a equação (7.6), tendo sido determinado o valor de  $FF = 0,21$ .

$$FF = \frac{A_{ext} + \sum (\tau A_{int})}{V} \quad 7.6$$

Foi calculado o  $N_i$  a partir do artigo 15.º do RCCTE [2], dependente dos valores do factor de forma e dos graus-dia em que para valores de  $FF < 0,5$  a expressão de cálculo admitida é conforme a equação (7.7).

$$N_i = 4,5 + 0,0395 \cdot GD \quad 7.7$$

Deste estudo depreende-se que em qualquer uma das situações, a habitação estudada não reúne as condições mínimas que satisfaçam aos limites considerados para o  $N_i = 51,51 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$ .

Analisando globalmente as perdas inerentes à habitação, verifica-se que a percentagem de perdas térmicas associadas à envolvente exterior representar cerca de 20% pelas paredes, e 12% nas pontes térmicas lineares no conjunto das perdas totais, quando se executa os cálculos através dos valores de ensaio. No total, as perdas pela envolvente exterior assumem 32% das perdas totais da habitação, que se estabelece próximo dos níveis encontrados para as perdas dos vãos envidraçados (29%) e renovação do ar (29%), excepção feita à envolvente interior (10%), não sendo por isso, para o caso específico da habitação estudada, um elemento que se destaca relativamente às restantes singularidades, devido também à área reduzida em contacto com o exterior. A percentagem aumenta pouco quando se procede à análise dos valores, cerca de 21% nas perdas superficiais pelas paredes exteriores e de 13% relativamente às pontes térmicas lineares.

Quando se adoptam os princípios do conforto adaptativo, tendo por base o referido na secção 2.2.2 ao nível da temperatura a que as pessoas na estação de aquecimento sentem conforto, a temperatura pode variar entre os 20 °C e os 17 °C como temperaturas mínimas [39]. Os cálculos realizados anteriormente têm por base o número de graus dia na base dos 20 °C com uma duração da estação de aquecimento de 5,3 meses (1 Novembro a 10 de Abril). Se os mesmos cálculos forem realizados na base dos 17 °C, o número de graus dia (GD) diminui para 710 °C·dia, diminuindo também a duração do período de aquecimento para 4 meses (20 Novembro a 20 Março). Nessa perspectiva resultam necessidades de aquecimento ( $N_{ic}$ ) inferiores ao anteriormente calculado para os valores de ensaio (Quadro 7.8) resultando também na diminuição das necessidades máximas com aquecimento ( $N_i$ ) como é possível verificar no Quadro 7.9.

Quadro 7.9 - Necessidades de aquecimento (GD 17)

GD 17 (°C·dia)	Duração (meses)	$N_{ic}$ (kWh·m <sup>-2</sup> ·ano <sup>-1</sup> )	$N_i$ (kWh·m <sup>-2</sup> ·ano <sup>-1</sup> )
710	4	32,58	32,55

Com este estudo verifica-se que utilizando a temperatura de referência de conforto de 17 °C, as necessidades nominais de energia ficam próximas de satisfazer ao limite da norma, tendo sido verificado uma redução de 52% face aos valores calculados para GD na base de 20 °C.

### 7.2.2.7. Efeito da Radiação Solar nas Perdas Térmicas da Envolvente Opaca

Da análise crítica do modelo térmico realizado para a habitação do “Gaioleiro”, concluiu-se que o efeito solar nas paredes em contacto com o exterior constitui uma mais-valia de modo a minimizar as perdas térmicas que ocorrem nos referidos elementos. Uma vez que ao nível regulamentar não é produzida qualquer tipo de consideração acerca do efeito do sol na estação de aquecimento, pretende-se dessa forma demonstrar o seu contributo na envolvente opaca da habitação estudada, na redução das necessidades térmicas com aquecimento. O processo de cálculo foi em tudo semelhante ao realizado na validação do modelo térmico, tendo sido utilizado o método da condução de calor na parede em regime dinâmico (secção 5.4).

Para proceder ao cálculo do efeito solar nas fachadas, foram utilizadas as radiações solares a Sudeste e Noroeste do ano climático de referência da cidade de Lisboa para o período de aquecimento do dia 1 de Novembro ao dia 10 de Abril correspondente aos 5,3 meses de Inverno. Nesta determinação, foi tomado em consideração o forte sombreamento que se faz sentir nas fachadas a Sudeste e a Noroeste, devido a edifícios mais altos e com empenas de maior comprimento. As obstruções que se fazem sentir vão ter uma forte influência na radiação solar directa, difusa e reflectida, factores que foram tomados em consideração na radiação solar utilizada para a realização dos cálculos, tendo sido adaptadas as radiações às obstruções existentes. No anexo G estão representadas as radiações e as obstruções consideradas no âmbito deste cálculo.

Devido ao facto de na estação de Inverno a altura solar ser francamente mais baixa comparativamente ao período de Verão, é esperado ainda assim que a radiação a Sudeste possa representar melhorias nas perdas térmicas, tendo em conta o efeito das obstruções conduzem a diminuições significativas.

Nesse sentido, foram calculados novos coeficientes de transmissão térmica para as paredes em contacto com o exterior utilizando a equação (6.10). Como já havia sido considerado na validação do modelo térmico, as pontes térmicas lineares serão também afectadas proporcionalmente em percentagem à afectação do  $U$  das paredes. Estes factores de redução resultam do cálculo dinâmico efectuado cujos ganhos solares estão representados na Figura e na Figura do anexo G, cujos ganhos solares foram obtidos mediante a aplicação da equação (6.9), sendo o  $U_{solar}$  calculado a partir da equação (6.10).

Numa perspectiva de aferir o contributo solar total nas paredes da habitação na estação de aquecimento, foi simulado também o seu comportamento face a uma radiação solar directa sem qualquer tipo de obstruções em ambas as fachadas (Quadro 7.10) e o peso dessa situação na determinação das perdas térmicas.

Quadro 7.10 - Ganhos térmicos pela parede ( $N_{ic}$ )

	Regime	Paredes			Unid.
		0,77 (m)		0,27 (m)	
		SE	NO	NO	
C/ Sombras	Permanente	62,47	62,47	113,42	kWh·m <sup>-2</sup>
	Dinâmico	58,63	60,47	109,58	
	Diferença	3,84	2,00	3,84	
S/ Sombras	Permanente	62,47	62,47	113,42	kWh·m <sup>-2</sup>
	Dinâmico	50,53	55,87	100,77	
	Diferença	11,94	6,60	12,65	

Os coeficientes de transmissão térmica ( $U$ ) das paredes com a respectiva contribuição solar são apresentados no Quadro 7.11.

Quadro 7.11 - Efeito do sol no  $U$  das paredes ( $N_{ic}$ )

Orientação	SE			NO			Saguão			Total	
Informação	Parede 0,77m	Parede 0,775m	Cantaria	Parede 0,775m	Parede 0,275m	Cantaria	Parede 0,74m	Parede 0,27m	Cantaria	Perdas (W·°C <sup>-1</sup> )	P. T. L (W·°C <sup>-1</sup> )
	RR	RI		RE	RE		RR	RR			
$U_{ensaio}$	1,38	1,37	1,59	1,37	2,48	1,59	1,42	2,50	1,59	51,30	31,49
$U_{solar\ c/\ sombra}$	1,24	1,24	1,46	1,30	2,34	1,46	1,42	2,50	1,59	48,00	29,47
$U_{solar\ s/\ sombra}$	0,96	0,95	1,17	1,14	2,03	1,14	1,42	2,50	1,59	40,77	25,03
$U_{referência}$	1,56	1,55	1,59	1,55	2,77	1,59	1,60	2,80	1,59	57,46	35,82

RE - Revestimento exterior de azulejo cerâmico e interior de reboco

RI - Revestimento interior de azulejo cerâmico e exterior de reboco

RR - Revestimento exterior e interior de reboco

Centrando a análise nas perdas térmicas pelas envolventes opacas, verifica-se desde logo um decréscimo assinalável entre os coeficientes de transmissão térmica medidos e os mesmos considerando o efeito solar com o sombreamento incluído e ainda uma redução mais significativa sem o efeito das sombras. Considerando que a área de parede capaz de absorver a radiação solar transmitida representa apenas 27% da envolvente da habitação, obtêm-se reduções face aos valores de ensaio de 6% se for considerado o efeito das sombras e 21% se o edifício estivesse totalmente exposto à radiação solar. De facto este efeito constitui um foco de redução importante das perdas térmicas na estação de arrefecimento, sendo uma matéria a ter em conta nas futuras revisões normativas.

Face ao cálculo das perdas para os valores convencionais, obtêm-se resultados que diferem em 16% comparativamente aos valores de ensaio com o efeito solar e das sombras, representando uma poupança efectiva de 468 kWh durante a estação de Inverno. Dos dados acima apresentados, resultam valores para as necessidades nominais de aquecimento ( $N_{ic}$ ) apresentados na Figura 7.2, perspectivando o efeito global do sol na redução das necessidades nominais.

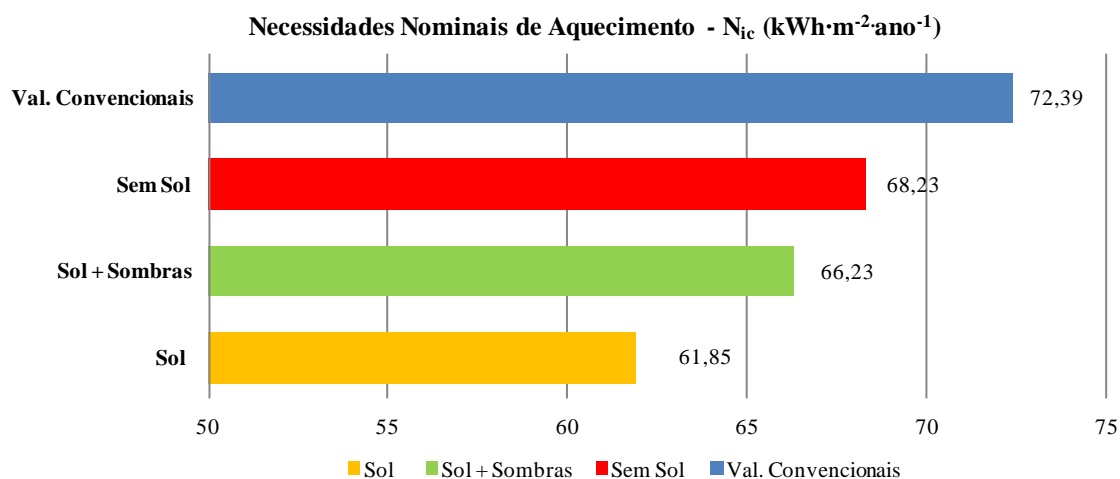


Figura 7.2 - Gráfico das necessidades de aquecimento ( $N_{ic}$ )

### 7.2.3. Método de Cálculo de $N_{vc}$ e Delimitação da Habitação

As necessidades nominais de arrefecimento de uma habitação ( $N_{vc}$ ), podem ser definidas como a energia útil que é necessário utilizar para manter permanentemente no seu interior uma temperatura de conforto definido no Artigo 14.º do RCCTE [2], que é estabelecida a 25 °C durante toda a estação de arrefecimento para os meses de Junho a Setembro. Nesta secção, procurou-se também determinar a diferença existente nas necessidades nominais de arrefecimento entre a utilização dos valores de ensaio e convencionais.

A metodologia de cálculo segundo o regulamento tem por base uma equação geral (7.8) que permite calcular as necessidades nominais de arrefecimento e é dada por:

$$N_{vc} = \frac{Q_g \cdot (1 - \eta)}{A_p} \quad 7.8$$

Em que  $Q_g$  representa os ganhos totais brutos da habitação (kWh);  $\eta$  o factor de utilização dos ganhos, e  $A_p$  a área útil de pavimento (m<sup>2</sup>). Os ganhos totais brutos são obtidos através da soma das seguintes parcelas:

- cargas individuais devidas aos fenómenos combinados da diferença de temperatura interior e exterior, e da incidência da radiação solar ( $Q_1$ );
- cargas devidas à entrada da radiação solar através dos envidraçados, ( $Q_2$ );
- cargas devidas à renovação do ar, ( $Q_3$ ), e
- cargas internas, devidas aos ocupantes, equipamentos e iluminação artificial, ( $Q_4$ ).

Para determinar os ganhos e perdas existentes pela envolvente, foi adoptada a temperatura de referência no interior da habitação de 25 °C, sendo o valor médio da temperatura do ar exterior na estação convencional de arrefecimento para a zona climática de Verão V2-S segundo o

regulamento (Quadro III.9), de 23 °C. As temperaturas diferem de 2 °C, o que corresponde de uma forma geral a perdas de calor do interior para o exterior da habitação.

Na Figura 7.3 encontra-se delimitada a envolvente da fracção considerada na determinação das perdas e ganhos de calor.

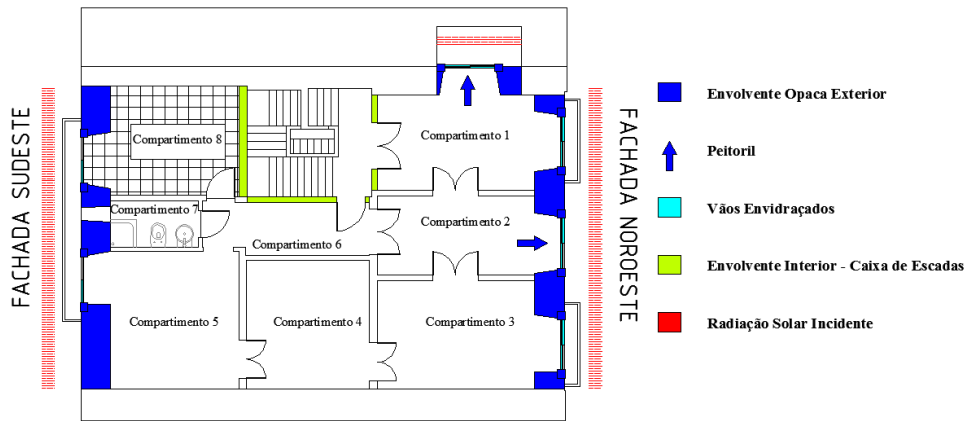


Figura 7.3 - Perdas e ganhos de calor pelas envolventes consideradas ( $N_{vc}$ )

### 7.2.3.1. Perdas Térmicas

As perdas térmicas da habitação dão-se pelos elementos opacos da mesma, nomeadamente pelas paredes em contacto com o exterior e vãos envidraçados, ao qual deve ainda ser somado as relativas às renovações horárias do ar interior da habitação. No sentido de determinar as referidas perdas, foram utilizadas as equações (7.9) e (7.10).

a) Envolvente Opaca

$$Q_1 = 2,928 \cdot U \cdot A \cdot (\theta_m - \theta_i) \quad 7.9$$

b) Renovação do Ar

$$Q_3 = 2,928 \cdot (0,34 \cdot Rph \cdot A_p \cdot P_d) \cdot (\theta_m - \theta_i) \quad 7.10$$

Onde  $\theta_m$  e  $\theta_i$  representam as temperaturas do ar exterior para a cidade de Lisboa que em média são de 23 °C (Quadro III.9, RCCTE [2]) e interior de 25 °C (Artigo 14.º), respectivamente. As perdas pela envolvente opaca e renovação de ar foram determinadas e apresentados os resultados no Quadro 7.12.

Quadro 7.12 - Perdas térmicas associadas à habitação ( $N_{vc}$ )

Perdas Térmicas Associada a:	Equação	Val. Ensaio	Val. Convencionais	Unid.
Envolvente Exterior	Q1	742,21	778,34	kWh
Vãos Envidraçados				
Renovação de Ar	Q3	450,67	450,67	kWh
Perdas Totais	-	1192,88	1229,01	kWh

## 7.2.3.2. Ganhos Térmicos

Com o aumento da temperatura e da intensidade solar que é característica na estação de Verão, existe um aumento dos ganhos térmicos da habitação, havendo uma clara sobreposição dos ganhos em relação às perdas térmicas.

Face às perdas já determinadas, segue-se o cálculo dos ganhos térmicos que dependem essencialmente do contributo dos ganhos relativos à absorção da radiação solar pelas paredes da envolvente, que corresponde à segunda parcela da equação  $Q_1$ , da radiação solar através dos vãos envidraçados ( $Q_2$ ) e finalmente os ganhos por ocupação da habitação ( $Q_4$ ).

$$Q_1 = U \cdot A \cdot \left( \frac{\alpha \cdot I_r}{h_e} \right) \quad 7.11$$

$$Q_2 = \sum_j [I_{rj} \cdot \sum A_{snj}] \quad 7.12$$

$$Q_4 = 2,928 \cdot q_i \cdot A_p \quad 7.13$$

Em que  $\alpha$  representa o coeficiente de absorção da superfície exterior da parede (quadro v.5);  $I_r$  a intensidade média de radiação total incidente em cada orientação durante a estação de arrefecimento, sabendo que a habitação se situa numa zona climática V2-S;  $h_e$  a condutância térmica superficial exterior que toma o valor de  $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ , e  $q_i$  os ganhos térmicos internos médios por unidade de área útil de pavimento ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

No Quadro 7.13 apresentam-se os resultados referentes aos ganhos pela envolvente opaca em contacto com o exterior. Foi considerado que o revestimento exterior da fachada a Noroeste é de cor escura, nas fachadas a Sudeste e saguão de cor media e as cantarias de cor clara.

Quadro 7.13 – Ganhos térmicos pela envolvente opaca exterior ( $N_{ve}$ )

Orientação	NO			SE				Saguão		
	Parede 0,775 m	Parede 0,275 m	Cantaria	Parede 0,77 m	Parede 0,775 m	Parede 0,775 m	Cantaria	Parede 0,74 m	Parede 0,27 m	Cantaria
	RE	RE		RR	RI	RI		RR	RR	
Área ( $\text{m}^2$ )	11,05	1,32	1,08	10,07	2,56	3,12	0,82	3,17	1,32	0,26
$U_{\text{ensaio}}$	1,37	2,48	1,59	1,38	1,37	1,37	1,59	1,42	2,50	1,59
$U_{\text{convencionais}}$	1,55	2,77	1,59	1,56	1,55	1,55	1,59	1,60	2,80	1,59
Coef. de Absorção ( $\alpha$ )	0,80	0,80	0,40	0,50	0,50	0,50	0,40	0,50	0,50	0,40
Intensidade Solar ( $I_r$ )	340	340	340	460	460	460	460	200	200	200
Condutância ( $h_e$ )	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Ganhos Val. Ensaio	164,73	35,64	9,33	127,59	32,21	39,30	9,54	17,99	13,23	1,34
Ganhos Val. Conv.	186,26	39,82	9,33	144,37	36,42	44,44	9,54	20,29	14,80	1,34

RE - Revestimento exterior de azulejo cerâmico e interior de reboco

RI - Revestimento interior de azulejo cerâmico e exterior de reboco

RR - Revestimento exterior e interior de reboco

Como é possível verificar pelos ganhos solares obtidos pelos vários elementos nos diferentes métodos, estes tornam-se mais receptivos aos ganhos de calor para maiores valores de coeficiente de transmissão térmica. De referir que nesta situação foi considerada uma intensidade solar ( $I_r$ ) para as paredes do saguão referente à orientação Norte, correspondente à radiação difusa, tendo sido mais uma vez tomada em consideração as condições inerentes à localização dos referidos elementos.

O cálculo dos ganhos solares através dos vãos envidraçados, foi realizado a partir da equação (7.12), o processo de cálculo relativo à determinação da área efectiva de envidraçado é em tudo semelhante à realizada anteriormente para as necessidades nominais de aquecimento e obtida através da equação (7.4). Os cálculos dos factores de obstrução ( $F_s$ ) determinados para o período de arrefecimento, estão disponíveis no anexo G e são iguais para ambos os métodos de cálculo.

Quadro 7.14 - Cálculo dos ganhos solares – vãos envidraçados ( $N_{vc}$ )

Referência Vão	Tipo de Vidro	Área (m <sup>2</sup> )	Factor Solar do Vão Env.	Factor de Obstrução (Fs)	Habitação Envidraçada (Fg)	Factor de Sel. Angular (Fw)	Área Efectiva (m <sup>2</sup> )	Radiação Solar (kWh·m <sup>-2</sup> )
Sacada_1_NO	Simples	3,32	0,85	0,93	0,50	0,90	1,18	340
Sacada_2_NO	Simples	3,32	0,85	0,93	0,50	0,90	1,18	340
Peitoril_1_NO	Simples	2,15	0,85	0,93	0,70	0,90	1,07	340
Sacada_1_SE	Simples	3,06	0,85	0,60	0,50	0,90	0,70	460
Sacada_2_SE	Simples	3,06	0,85	0,61	0,50	0,90	0,71	460
WC_SE	Simples	0,12	0,85	0,27	0,70	0,90	0,02	460
Peitoril_2_Sag.	Simples	2,15	0,54	0,27	0,70	0,90	0,20	200

Para o factor solar dos vãos envidraçados, foi considerado que não existe qualquer protecção à radiação solar à excepção dos vidros simples, a excepção é feita à janela de peitoril referente ao saguão que possui portadas de madeira de cor média com factor solar de 0,40. Nesse sentido e de acordo com o RCCTE [2], foi considerado que os dispositivos móveis estão activos a 70%, ou seja, o factor solar do vão envidraçado é igual à soma de 30% do factor solar do vidro mais 70% do factor solar do vão envidraçado com a protecção móvel activada.

À semelhança do que já havia sido considerado anteriormente, os ganhos internos médios de calor são de 4 W·°C<sup>-1</sup> sendo os seus contributos para a estação de arrefecimento calculados de acordo com a equação (7.13).

Os ganhos térmicos totais para a habitação estudada na estação de arrefecimento, estão representados no Quadro 7.15 síntese do processo de cálculo realizado.

Quadro 7.15 - Ganhos térmicos totais ( $N_{vc}$ )

<b>Ganhos associados a:</b>	<b>Val. Ensaio</b>	<b>Val. Convencionais</b>	<b>Unid.</b>
Envolvente Opaca	450,91	506,61	kWh
Vãos Envidraçados	1863,42	1863,42	kWh
Ganhos Internos	883,67	883,67	kWh
Ganhos Totais	3198,00	3253,70	kWh

Pelo balanço térmico realizado entre ganhos e perdas que envolvem a habitação, estimou-se um  $\gamma = 2,68$  para os valores de ensaio e de  $\gamma = 2,65$  para os valores convencionais que conduzem a factores de utilização de  $\eta = 0,37$  para ambos os casos, associados a uma inércia térmica forte.

Destaca-se nesta situação os ganhos relativos aos envidraçados que apesar do sombreamento que se faz sentir, representam uma parcela significativa dos ganhos em ambas as situações de cálculo representando cerca de 58% e 57% do valor total, o que evidencia a representatividade dos vãos envidraçados na área total da envolvente exterior. De referir que o contributo da envolvente opaca representa 14% dos ganhos totais para os valores de ensaio e 16% para valores convencionais.

### 7.2.3.3. Necessidades Térmicas de Arrefecimento

O cálculo das necessidades nominais de arrefecimento ( $N_{vc}$ ) de uma habitação é realizado conforme a equação (7.8), sendo os resultados obtidos demonstrados no Quadro 7.16.

Quadro 7.16 - Necessidades Nominais de Arrefecimento ( $N_{vc}$ )

<b>Necessidade Nominais de Arrefecimento - <math>N_{vc}</math></b>	
Val. Ensaio	Val. Convencionais
26,73 kWh·m <sup>-2</sup> ·ano <sup>-1</sup>	27,01 kWh·m <sup>-2</sup> ·ano <sup>-1</sup>

Da análise realizada para as necessidades nominais de arrefecimento, os resultados não se traduzem em diferenças significativas quando utilizados os valores de ensaio e os valores convencionais. Este facto deve-se sobretudo ao baixo contributo das perdas e ganhos térmicos pela envolvente opaca na estação de Verão, uma vez que as diferenças entre métodos residem apenas nos coeficientes de transmissão térmica adoptados. Assim, foi estabelecida uma diferença de aproximadamente 1%, sendo este valor pouco significativo.

O valor limite estabelecido para as necessidades nominais para arrefecimento é de  $N_v = 32$  kWh·m<sup>-2</sup>·ano<sup>-1</sup> (Artigo 15.º, RCCTE [2]). Da análise realizada verifica-se que o comportamento da habitação se adapta ao regulamento, sendo até inferior em cada umas situações a aproximadamente 16% do valor limite máximo, esta situação deve-se à área de envolvente em contacto com o exterior e também ao facto do edifício ser fortemente sombreado. As características das paredes e a sua elevada espessura associados a uma inércia térmica forte, contribuem também para o cumprimento do valor das necessidades de arrefecimento.

### 7.3. Avaliação de Oportunidades de Melhoria

Através da caracterização térmica realizada para a habitação estudada, foi possível concluir que existe de facto um défice comportamental da mesma relativamente às necessidades nominais de aquecimento ( $N_{ic}$ ). Apesar das necessidades nominais de arrefecimento ( $N_{vc}$ ) serem inferiores ao valor limite disposto no regulamento, o mesmo pode ser melhorado para valores que conduzam a uma classificação térmica que se adapte às exigências da actual época em que vivemos.

Na realidade, o nível de isolamento da habitação é apenas garantido pelos materiais que compõem as paredes e vãos envidraçados, o que se revela claramente insuficiente para o cumprimento normativo, na medida em que as exigências térmicas são hoje consideradas fundamentais para o licenciamento das habitações. O nível de desgaste dos materiais evidencia uma clara necessidade de reforço do isolamento térmico no caso das paredes e alternativas aos vãos envidraçados existentes, como garantia de redução dos consumos.

Uma vez que o edifício apresenta um carácter histórico e como abordado na secção 2.1.4 do presente trabalho, deverá ser tomado em consideração que qualquer intervenção a ser realizada será mediante uma abordagem que não altere as fachadas do edifício, limitando por isso o leque de opções disponíveis para intervir da melhor forma possível. Serão então abordadas oportunidades de melhoria para a habitação estudada, tendo sempre em consideração as imposições previamente definidas para este tipo de edificado, sendo apenas tratadas as envolventes verticais em contacto com o exterior e envolventes interiores em contacto com espaço útil e não útil.

A base de realização das melhorias efectivas e aplicação dos novos materiais será a análise com os valores de ensaio e com a contribuição do sol e sombras para a estação de aquecimento, para a de arrefecimento foi a determinada na subsecção 7.2.3.3. De referir ainda que no âmbito das propostas de melhoria que serão analisadas, não será abordado o efeito das medidas consideradas na ventilação da habitação, sendo esses aspectos tratados por Silva (2011) [35]. O valor considerado para o número de renovações horárias no âmbito das oportunidades de melhoria será de  $0,6 \text{ h}^{-1}$  (cenário base), correspondente ao valor mínimo indicado no Artigo 14.º do RCCTE [2].

#### 7.3.1. Propostas de Reabilitação - Paredes

Nesta secção apresentam-se soluções de isolamento para as paredes da habitação estudada, tendo em conta os consumos energéticos da mesma e as limitações inerentes ao processo de reabilitação. A colocação de isolamento térmico nas paredes vai permitir reduzir as trocas de calor entre o ambiente interior, exterior e espaços não aquecidos e satisfazer os requisitos de qualidade da envolvente, obtendo valores para o coeficiente de transmissão térmica próximos dos apresentados no Quadro 2.3 referente à secção 2.2.1.

De acordo com a revisão bibliográfica efectuada, nomeadamente no ponto respeitante à contribuição da inércia térmica das paredes (secção 2.2.1), concluiu-se que do ponto de vista térmico, a solução mais vantajosa na maioria dos casos de reabilitação passa por uma intervenção realizada pelo exterior, uma vez que neste caso concreto, as paredes da envolvente possuem um elevado peso específico associada a uma inércia térmica forte. Nesta situação, estaria garantida a funcionalidade do fenómeno associado à inércia térmica, deixando intacta a capacidade das paredes em reter o calor tendo posteriormente a capacidade de o libertar, sendo desta forma uma fonte de armazenamento de calor.

Dadas as condicionantes inerentes ao facto da identidade histórica do edifício estudado, a opção incidu numa perspectiva de isolamento pelo interior, possibilitando assim a manutenção da identidade arquitectónica da fachada. Este tipo de solução, facilita o processo de reabilitação visto ser o de mais fácil execução e menos dispendioso quando comparado com as restantes soluções (isolamento pelo exterior e caixa-de-ar). A aplicação de isolamento térmico pelo interior pressupõe a perda total da contribuição da inércia térmica das paredes da envolvente, funcionando o isolamento como uma barreira protegendo o interior de alterações da temperatura promovidas pelo calor armazenado pelas paredes exteriores. Para além do referido, esta aplicação tem como consequência a diminuição da área útil de pavimento com implicações directas no cálculo das necessidades de aquecimento e arrefecimento.

#### **7.3.1.1. Descrição das Soluções**

Nesta reabilitação serão tratadas as paredes de fachada, Noroeste e Sudeste, as paredes em contacto com o saguão, edifícios adjacentes e caixa de escadas. De referir que a intervenção a realizar pressupõe a remoção de todos os revestimentos interiores, os azulejos cerâmicos existentes no compartimento 7 (casa de banho), compartimento 8 (cozinha) e a madeira colocada nas cantarias, sendo aplicado um revestimento único em toda a habitação.

O edifício possui um plano de reabilitação aprovado pelas entidades competentes onde é prevista a utilização de lã de rocha (MW) com cerca de 0,05 m de espessura e placas de gesso cartonado com 0,01 m que complementa o sistema de isolamento. Foram igualmente consideradas as seguintes soluções de reabilitação de paredes: execução de uma contra-fachada pelo interior com a aplicação de placas de isolamento térmico de poliestireno expandido extrudido (XPS), com diferentes espessuras que variam entre os 0,03, 0,06 e 0,09 m. Como revestimento exterior, serão neste caso também consideradas placas de gesso cartonado que conferem ao sistema uma maior resistência mecânica protegendo o isolamento de eventuais choques mecânicos e também pelo facto de possuir um carácter incombustível, conferindo alguma protecção contra o fogo. Admite-se que nas soluções consideradas para a reabilitação das paredes, a fixação dos elementos à parede

é realizada através de pontos de argamassa distribuídos uniformemente pela placa e colados directamente à parede não sendo criado nenhum espaço de ar entre elementos.

Definidas as soluções, serão apresentadas em seguida as principais características dos elementos considerados no Quadro 7.17. De referir que os coeficientes de transmissão térmica das paredes com o contributo do isolamento térmico estão disponíveis no anexo E.

Quadro 7.17 - Características dos isolamentos térmicos

Isolamento	Espessura (m)	Massa Volúmica ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Condutibilidade ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ )
MW	0,05	35	0,045
XPS	0,03	30	0,037
	0,06	30	
	0,09	30	
Gesso Cartonado	0,01	900	0,25

### 7.3.1.2. Poupança energética e viabilidade económica – Análise de Resultados

Com a aplicação do isolamento térmico pelo interior, espera-se reduzir consideravelmente os gastos energéticos na estação de aquecimento e de arrefecimento. Nessa perspectiva considerou-se a colocação conjunta dos seguintes sistemas que constituem as soluções a aplicar:

- **solução 1** – MW (0,05 m) + gesso cartonado (0,01 m);
- **solução 2** – XPS (0,03 m) + gesso cartonado (0,01 m);
- **solução 3** – XPS (0,06 m) + gesso cartonado (0,01 m), e
- **solução 4** – XPS (0,09 m) + gesso cartonado (0,01 m).

Como já foi anteriormente referido, numa perspectiva de isolamento pelo interior as consequências directas dessa aplicação passam sobretudo pela redução da área útil e da inércia térmica associada à habitação. As referidas variações foram estimadas para os diferentes modelos de isolamento sendo apresentados os resultados no Quadro 7.18.

Quadro 7.18 - Variação da área útil de pavimento e inércia térmica

	Base	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
<b>Espessura Sistema</b>	<b>0,00</b>	<b>0,06</b>	<b>0,04</b>	<b>0,07</b>	<b>0,10</b>
<b>Área Útil</b>	75,45	73,08	73,87	72,68	71,50
<b>Inércia Térmica</b>	475,29	293,76	290,61	295,35	300,25
<b>Classificação</b>	Forte	Média	Média	Média	Média

Com base no cálculo em regime estacionário ISO 13790 [3] e RCCTE [2], foram calculadas as contribuições das soluções consideradas para as necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento da habitação do piso 2 do edifício “Gaioleiro”.

Com base nas perdas térmicas determinadas para as paredes em contacto com o exterior e espaços não climatizados, apresenta-se na Figura 7.4 um gráfico de comparação entre os consumos

energéticos da habitação relativos à situação actual e depois de aplicadas as soluções de isolamento térmico nas paredes para a estação de aquecimento.

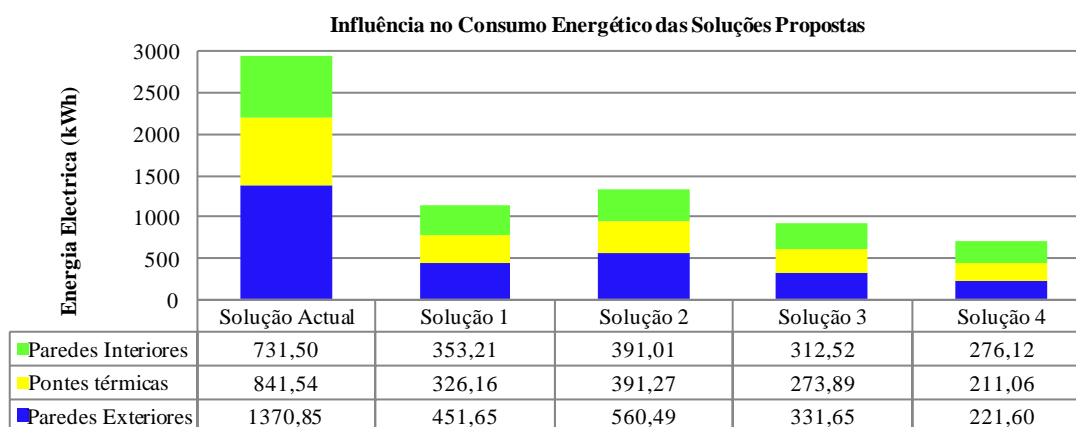


Figura 7.4 - Gráfico da influência no consumo energético – Reabilitação paredes (Inverno)

De acordo com a Figura 7.4, verifica-se uma influência muito significativa das soluções adoptadas no reforço do isolamento térmico da habitação. Inicialmente, o consumo de energia que era necessário para compensar as perdas pelas paredes exteriores e interiores era de 2944 kWh, tendo sido obtidas reduções que variam entre os 77% (máximo) que corresponde à solução 4 e os 54% (mínimo) que corresponde à solução 2.

Com a reabilitação térmica das paredes que estão sujeitas a trocas de calor, obtêm-se reduções muito importantes no consumo de energia eléctrica. Para a estação de aquecimento, as reduções estimadas têm um contributo importante nos gastos globais da habitação, pelo que se verificou o efeito destas medidas nas necessidades nominais de aquecimento da habitação ( $N_{ic}$ ) face às condições em que se encontra actualmente.

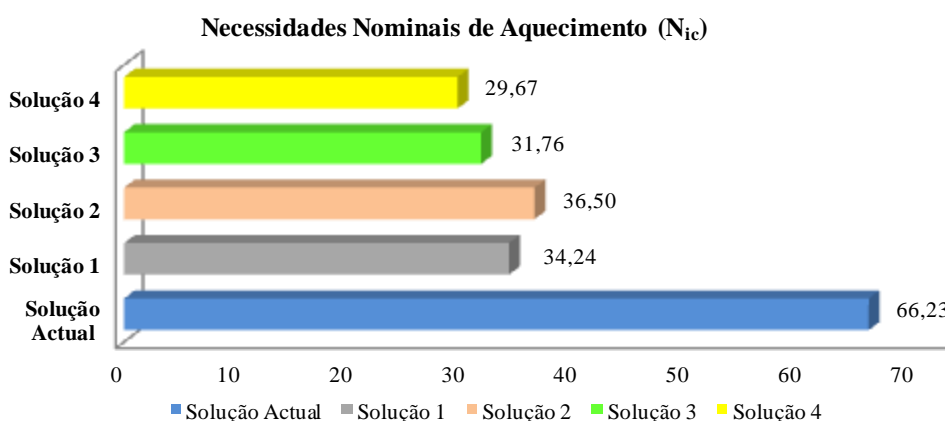


Figura 7.5 - Gráfico das necessidades nominais de aquecimento - Reabilitação paredes ( $N_{ic}$ )

A partir da Figura 7.5 verifica-se o efeito das medidas implementadas a um nível global de consumo de energia. A acção isolada da aplicação de isolamento térmico nas paredes da envolvente da habitação contribui desde logo para diminuir o  $N_{ic}$  de modo a cumprir as exigências

mínimas do regulamento face às necessidades nominais máximas ( $51,51 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$ ). É de salientar o nível de redução obtido através destas medidas que se estabelecem sempre superiores a 45%, tendo sido obtido no caso da solução 4 uma redução de 55%. Assim, a aplicação dos isolamentos térmicos nas paredes da envolvente constitui uma medida que se revelou bastante benéfica para a redução das necessidades nominais de aquecimento.

Tendo por base as perdas e os ganhos térmicos associados à habitação no Verão, foi avaliada a contribuição das soluções preconizadas de isolamento térmico da envolvente opaca da habitação, na redução efectiva dos valores anteriormente estabelecidos. Na Figura 7.6 são demonstradas as perdas e os ganhos térmicos que resultam da aplicação dos sistemas de isolamento.

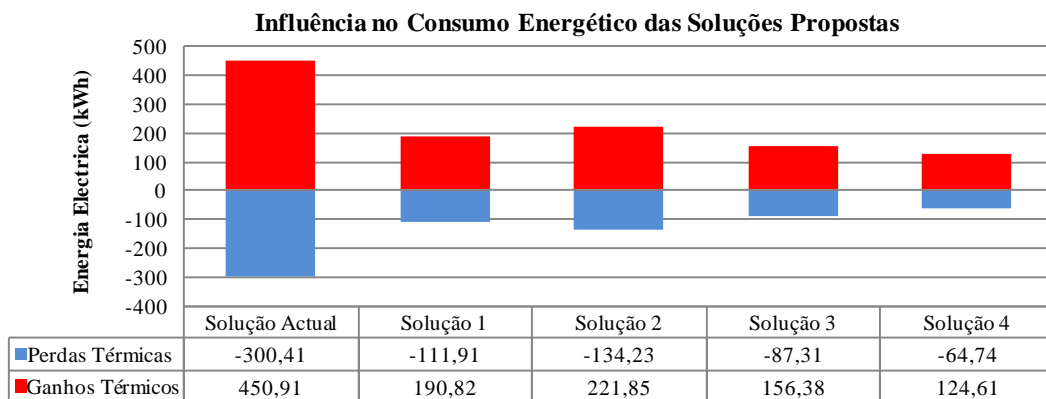


Figura 7.6 - Gráfico da influência no consumo energético - Reabilitação paredes (Verão)

Na perspectiva das necessidades de arrefecimento é pretendido que ao nível da envolvente opaca sejam reduzidos os ganhos e ao mesmo tempo se promovam as perdas térmicas no sentido de arrefecer de forma natural a habitação. Nesse sentido as soluções que apresentam sistemas de menor espessura de isolamento, constituem assim soluções mais equilibradas. De acordo com o gráfico, destaca-se a solução 4 que apresenta reduções de 78% para as perdas térmicas e 72% dos ganhos, uma vez que apresenta maior espessura de isolamento. Serão agora apresentados os resultados globais referentes às necessidades nominais de arrefecimento ( $N_{vc}$ ), com o contributo das soluções aplicadas (Figura 7.7).

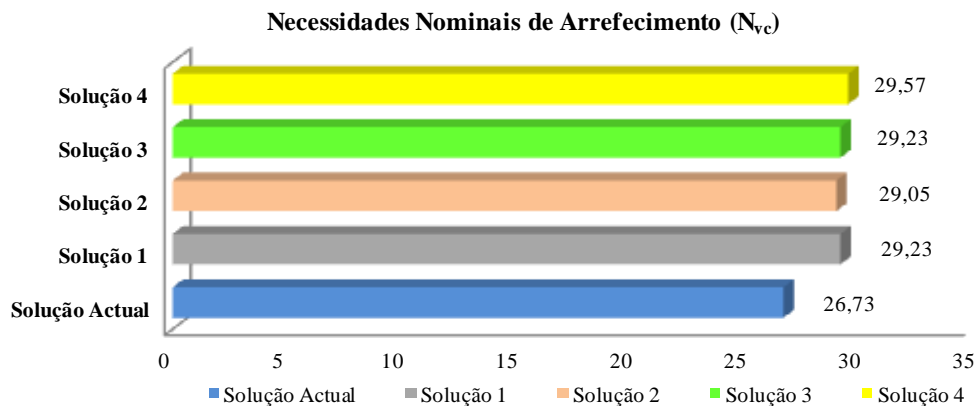


Figura 7.7 - Gráfico das necessidades nominais de arrefecimento - Reabilitação paredes ( $N_{vc}$ )

Face às exigências para o cumprimento do regulamento RCCTE [2] no que diz respeito às necessidades nominais de arrefecimento máximo ( $N_v = 32 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$ ), a habitação antes da intervenção garantia já um bom comportamento dadas as perdas e ganhos elevados que se fazem sentir no período de Verão, equilibrando o seu balanço energético. Dos resultados obtidos para as necessidades de arrefecimento representadas no gráfico em cima, conclui-se que o facto de se proceder ao isolamento da habitação, o efeito é claramente negativo e traduz-se num aumento de energia para arrefecimento. Os valores não diferem mais de 10% face ao valor inicial, mas ainda assim é de salientar que tal fenómeno é devido principalmente à redução das perdas térmicas existentes alterando de certa forma o equilíbrio do balanço energético da habitação o que contribui para um maior consumo de energia no Verão e por outro também devido à perda do efeito da inércia térmica das paredes em contacto com o exterior.

Depois de ponderada a influência da aplicação do revestimento nas paredes da envolvente da habitação, pode concluir-se que o seu contributo ao nível térmico não suscita qualquer reserva quanto às vantagens da aplicação dos sistemas, tendo uma influência claramente positiva quando se trata da estação de aquecimento e os aumentos na estação de arrefecimento não constituem resultados que coloquem em causa o processo de reabilitação da envolvente opaca. No entanto, embora se registem reduções importantes nos consumos energéticos, existe associado ao processo de reabilitação, um investimento financeiro inicial que se torna importante determinar e perspectivar o período de retorno do investimento face à poupança anual de energia.

De acordo com os princípios adoptados no “Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios” [22] no seu artigo 32.º, as medidas de reabilitação têm carácter obrigatório se o período de retorno para a sua implementação for de oito anos ou menos, de modo a tornar a reabilitação sustentável. Assim sendo, no cálculo realizado tomou-se esse período como referência, o custo das diferentes soluções é referente ao custo máximo dos sistemas de isolamento térmico por metro quadrado de parede, para que o retorno financeiro seja de 8 anos tendo em conta as poupanças energéticas que se conseguem obter através do seu funcionamento.

Dada a actual volatilidade de preços no actual mercado da energia eléctrica, o custo unitário de energia (kWh) tem vindo a sofrer várias actualizações. No presente trabalho admitiu-se que os valores calculados são associados a um custo unitário de energia (kWh) de 0,10 €, sabendo que numa perspectiva futura este valor possa estar completamente ultrapassado, fazendo variar a viabilidade das propostas apresentadas. A área de parede a reabilitar referente à envolvente opaca é de  $109,4 \text{ m}^2$ , uma vez que o projecto inicial contempla o isolamento de toda a envolvente, exterior, caixa de escadas e edifícios adjacente, mesmo tendo sido considerado no âmbito do cálculo energético que não existem perdas para espaços de igual utilização.

Os resultados apresentados no Quadro 7.19 são referentes às poupanças energéticas associadas à aplicação de isolamento térmico na envolvente da habitação objecto de estudo, tendo sido contabilizada a redução de energia no Inverno e por outro lado o aumento no Verão.

Quadro 7.19 - Custo máximo para período de retorno até 8 anos – reabilitação paredes

Medidas Reabilitação	Redução Energética (kWh)	Poupança Monetária (€/ano)	Poupança Monetária (€/m <sup>2</sup> )	Custo Máximo 8 anos (€/m <sup>2</sup> )	Custo Máximo 10% Utilização (€/m <sup>2</sup> )
Melhoria Paredes 1	2156,04	215,60	1,97	15,77	1,58
Melhoria Paredes 2	2026,93	202,69	1,85	14,82	1,48
Melhoria Paredes 3	2320,90	232,09	2,12	16,97	1,70
Melhoria Paredes 4	2408,24	240,82	2,20	17,61	1,76

A redução energética estimada assenta no princípio de que a habitação encontra-se permanentemente às temperaturas de conforto durante as estações de aquecimento (20 °C) e arrefecimento (25 °C), no entanto, a realidade dos edifícios habitacionais não se enquadra com esta premissa uma vez que tendencialmente os equipamentos são accionados mediante a sua ocupação. Nesse sentido e de acordo com estabelecido no RCCTE [2], apenas é utilizada 10% da energia prevista para colmatar as necessidades de aquecimento e arrefecimento, representando assim o período de ocupação das habitações domésticas. Nessa perspectiva as reduções energéticas são igualmente afectadas e conseqüentemente o custo máximo das soluções para um período de retorno simples de 8 anos desce drasticamente para valores que não se consideram praticáveis no mercado actual, como representado na última coluna relativa ao Quadro 7.19.

No âmbito das oportunidades de melhoria, foi realizada uma sondagem de mercado no sentido de obter preços unitários do material utilizado nas medidas de reabilitação das paredes, onde se incluem a lã de rocha (MW), o poliestireno expandido extrudido (XPS) e o gesso cartonado. Os valores são conforme os apresentados no Quadro 7.20.

Quadro 7.20 - Preços unitários para isolamentos de paredes (Fonte: Siper)

Material	Espessura	€/m <sup>2</sup>	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
MW	0,05	5,76	9,25 €/m <sup>2</sup>	9,45 €/m <sup>2</sup>	15,42 €/m <sup>2</sup>	21,57 €/m <sup>2</sup>
XPS	0,03	5,96				
	0,06	11,93				
	0,09	18,08				
Gesso Cartonado	0,01	3,49				

Os preços apresentados dizem apenas respeito ao custo do material, não tendo sido previsto o custo adicional dos trabalhos de montagem e materiais acessórios. Ainda assim, os valores apresentados permitem uma ideia geral dos valores praticados no mercado actual e podem ser utilizados para a determinação do período de retorno efectivo do investimento.

Considerando o potencial de redução de energia associado à aplicação das medidas e o facto de apenas 10% das necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento serem utilizadas no âmbito dos edifícios habitacionais, os períodos de retorno associados são de 47 e 98 anos, o que de facto se considera insustentável numa perspectiva económica.

### **7.3.2. Propostas de Reabilitação de Vãos Envidraçados**

Como foi possível verificar pelas análises realizadas, o comportamento dos vãos envidraçados da habitação é claramente insuficiente e a sua influência é bastante significativa no balanço energético final. Os vãos envidraçados a considerar devem então cumprir os requisitos de qualidade da envolvente ao nível do coeficiente de transmissão térmica, apresentados no Quadro 2.3 referente à secção 2.2.1 e o factor do vidro deverá ser inferior a 0,56 que corresponde a uma habitação com inércia térmica média e forte.

No presente capítulo pretende-se então definir oportunidades de melhoria para os vãos envidraçados que visem o melhoramento térmico da envolvente exterior, dado os elementos existentes não garantirem condições de conforto térmico uma vez que são compostos por vidro simples e caixilharia de madeira em muito mau estado dado o visível empenamento dos vãos, facilitando assim a entrada do ar na habitação potenciando as perdas associadas à ventilação.

Neste contexto, a escolha dos vãos envidraçados deve ter em conta algumas considerações fundamentais para o bom funcionamento do sistema em ambas as estações de aquecimento e arrefecimento. Devem por isso ser promovidas soluções que controlem as infiltrações do ar através das juntas da caixilharia e a permeabilidade ao ar exterior de forma a melhorar o seu desempenho na estação de aquecimento, reduzindo as perdas de calor do interior para o exterior. É também importante considerar a acção do vidro para as diferentes estações, uma vez que na estação de aquecimento pretende-se que o vidro seja um elemento que potencie a entrada de calor contribuindo para o aquecimento da habitação. Para a estação de arrefecimento, interessa reduzir os ganhos de calor pelos envidraçados, uma vez que contribuem para o aquecimento do interior da habitação sendo necessário aumentar os gastos da energia para arrefecimento.

Existe também nesta matéria um condicionamento às soluções a aplicar uma vez que os vãos envidraçados são parte integrante da fachada. Assim sendo, as soluções previstas devem ter em conta este aspecto, mantendo os materiais e as características arquitectónicas.

#### **7.3.2.1. Descrição das soluções**

Atendendo às condições impostas para a reabilitação dos vãos envidraçados, a escolha dos elementos considerados para reforçar a envolvente exterior são constituídos por madeira e vidro duplo de carácter simples ou especial dependendo da solução considerada.

Ao nível do projecto inicial, foi considerado que o existente seria substituído por caixilharia de madeira, constituída por vidro duplo reflectante incolor com câmara-de-ar de 12 mm de espessura. O vidro exterior de 6 mm é temperado e o interior laminado possuindo 8 mm de espessura, constituindo assim a solução 1.

As propostas de substituição dos vãos envidraçados passam por três soluções utilizando uma caixilharia de madeira que possui uma condutibilidade térmica útil de  $0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ . A esta caixilharia estarão associadas duas soluções de vidro, a primeira será um vidro duplo incolor com 5 mm + 5 mm com uma espessura da lamina de ar de 6 mm (solução 2), a segunda alternativa é relativa a um vidro duplo baixo emissivo ( $\varepsilon = 0,10$ ) com 6 mm + 6 mm e espessura da lâmina de ar de 16 mm (solução 3). Por fim, foi considerada uma solução que visa a manutenção dos elementos existentes partindo do princípio que os mesmos possam ser reabilitados, colocando uma janela com caixilho de madeira com condutibilidade de  $0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ , formando assim um sistema de janela dupla com vidro duplo incolor 5 mm + 5 mm (solução 4). Nas presentes considerações, todos os vãos envidraçados serão intervencionados, ou seja, as alterações contemplam quatro janelas de sacada, duas de peitoril e ainda a relativa ao compartimento 7.

No âmbito das protecções solares consideradas para a reabilitação dos vãos envidraçados, foi avaliada a existência de portadas de madeira de cor clara aplicadas pelo interior dos vãos, tendo este sistema influência no coeficiente de transmissão térmica do conjunto e também no factor solar associado ao vidro. Nessa perspectiva procedeu-se ao cálculo do coeficiente de transmissão térmica dia-noite ( $U_{wdn}$ ), sabendo que a resistência térmica associada à portada de madeira é de  $0,10 \text{ m}^2\cdot\text{°C}\cdot\text{W}^{-1}$  e o espaço de ar entre a protecção e o vão envidraçado é de  $0,22 \text{ m}^2\cdot\text{°C}\cdot\text{W}^{-1}$  [60].

Para estimar o  $U_{wdn}$  dos vãos envidraçados, foi calculado de acordo com a equação (7.14), [60]:

$$U_{wdn} = \frac{U_w + U_{ws}}{2} \quad 7.14$$

Em que,  $U_w$  representa o coeficiente de transmissão térmica associado ao vão envidraçado sem dispositivo de oclusão ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$ ), e  $U_{ws}$  é o coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado mais o contributo da portada e do espaço de ar existente ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$ ) dado pela seguinte expressão:

$$U_{ws} = \frac{1}{\left(\frac{1}{U_w} + \Delta R\right)} \quad 7.15$$

Em que  $\Delta R$ , representa o acréscimo de resistência térmica dado pelos elementos de obstrução.

O factor solar do envidraçado com a protecção móvel activa, onde se considerou que a protecção está activa a 70% na estação de arrefecimento e dado que o factor solar do vidro de algumas

soluções variam do habitual vidro duplo simples, foi estimado um factor ( $g_{\perp}$ ) a partir da equação (7.16).

$$g_{\perp} = \frac{g_{\perp}' \cdot g_{\perp V}}{0,75} \quad 7.16$$

Em que  $g_{\perp}'$ , representa o factor solar do vão envidraçado com protecção solar e vidro duplo incolor, e  $g_{\perp V}$ , factor solar do envidraçado. Para a estação de aquecimento foi considerado o factor do vidro com a contribuição de uma cortina muito transparente.

As características mais relevantes associadas aos vãos envidraçados que compõem as soluções definidas serão apresentadas no Quadro 7.21.

Quadro 7.21 - Características térmicas dos vãos envidraçados

Solução	Tipo de Janela	Tipo de vidro e espessura nominal da lâmina de ar (mm)	$U_w$	$U_{wdn}$	Factor do vidro ( $g_{\perp V}$ )	Factor solar do envidraçado com protecção móvel ( $g_{\perp}$ )		
						Inverno	Verão	
1	Sacada	Duplo	8	1,6	1,27	0,34	0,28	0,20
	Peitoril							
2	Sacada	Duplo	16	2,8	1,93	0,75	0,63	0,44
	Peitoril			2,7	1,89			
3	Sacada	Duplo	16 baixa $\epsilon$ , $\epsilon = 0,10$	1,8	1,40	0,50	0,42	0,29
	Peitoril			1,8	1,40			
4	Sacada	Janela Dupla		2,5	1,79	0,75	0,63	0,44
	Peitoril			2,4	1,73			

### 7.3.2.2. Poupança energética e viabilidade económica

A partir dos vãos envidraçados seleccionados, o objectivo passa pela determinação das poupanças energéticas para a estação de aquecimento ( $N_{ic}$ ) e de arrefecimento ( $N_{vc}$ ).

Para o período de aquecimento, foram então estimados os novos valores de perdas térmicas associadas aos vãos envidraçados assim como os ganhos resultantes da influência solar nos vidros, os resultados obtidos são conforme os apresentados na Figura 7.8.

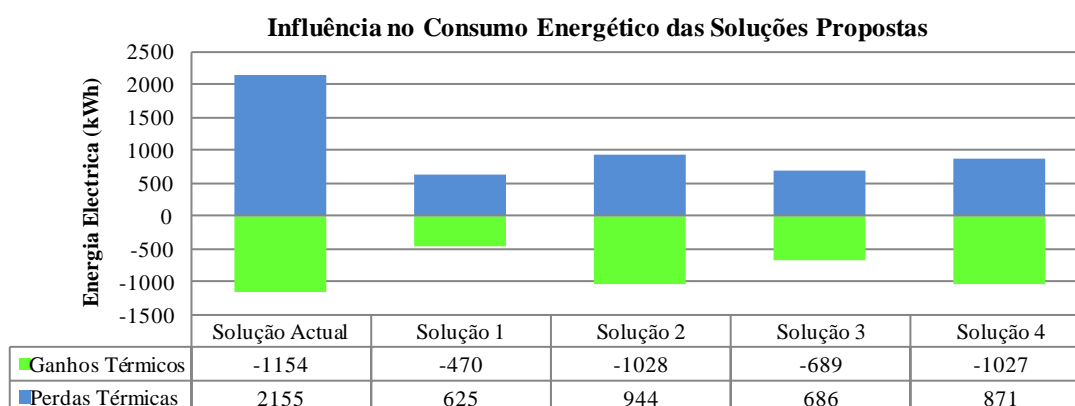


Figura 7.8 - Gráfico da influência no consumo energético – Reabilitação vãos envidraçados (Inverno)

Da análise do gráfico, verifica-se desde logo o efeito substancial existente nas perdas térmicas associadas aos vãos envidraçados comparativamente à solução inicial, onde a máxima redução acontece para a solução 1 com uma redução de 70% face ao existente. Da mesma forma pode ser comparada a solução que com menos influência nas perdas térmicas, que corresponde à solução 2 com uma redução de 56%.

O bom comportamento às perdas térmicas por condução poderá muitas vezes implicar a maior estanquidade dos elementos à entrada do sol neste período, que constitui uma fonte importante para os ganhos térmicos. Da solução 1 obtém-se uma redução de 60% face à solução inicial o que decerto tornará esta solução pouco eficaz diminuindo os ganhos provenientes da incidência solar de uma forma drástica no período de Inverno. No que diz respeito às soluções que mais promovem os ganhos solares, as mesmas são referentes às soluções 2 e 4 onde efectivamente reduzem em 11% apenas em relação às soluções iniciais.

Uma vez determinadas as influências energéticas das soluções, interessa agora verificar ao nível global das necessidades nominais de aquecimento ( $N_{ic}$ ), qual o seu contributo efectivo e reduções previstas.

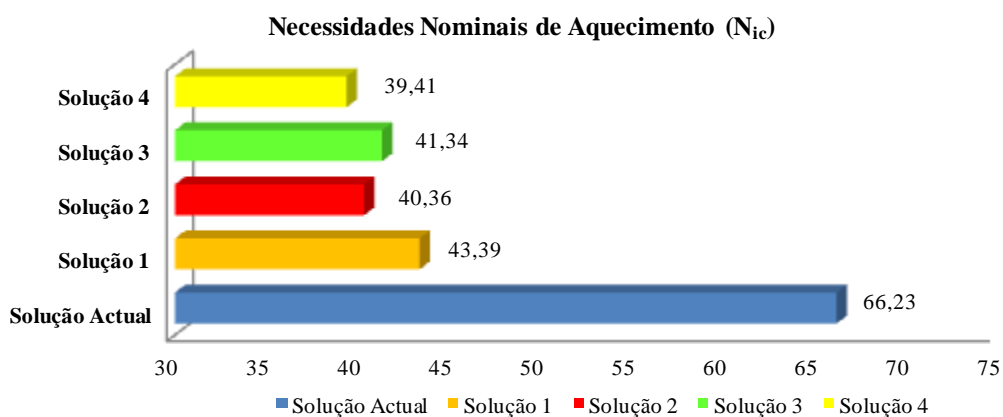


Figura 7.9 - Gráfico das necessidades nominais de aquecimento – Reabilitação vãos envidraçados ( $N_{ic}$ )

Face ao demonstrado no gráfico, deve ser referido desde logo que para ambas as soluções fica garantido o cumprimento das exigências mínimas do RCCTE [2], no que se refere às necessidades nominais máximas com aquecimento ( $51,51 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$ ).

Os resultados finais de ambas as soluções para as necessidades nominais de aquecimento são valores algo semelhantes, onde se destaca a solução 1 como sendo a que piores resultados apresenta, devido essencialmente ao factor solar do vidro. Pela positiva destaca-se a solução 4 como a que melhores resultados atingiu, com uma redução das necessidades nominais de aquecimento de 40% representando uma poupança de 2023,57 kWh para a estação de aquecimento. Nesta perspectiva e dado as aproximações de resultados, a melhor opção será uma conjugação entre as poupanças energéticas e o custo de cada solução proposta, uma vez que ficou

demonstrado que ambos os elementos possuem um bom funcionamento para o período de aquecimento.

Para a estação de arrefecimento, os vãos envidraçados adquirem um papel muito importante nas reduções dos ganhos solares pelos envidraçados. Nessa perspectiva foi verificado o comportamento das soluções adoptadas nos consumos de energia. O impacto das soluções consideradas para efeitos do período de arrefecimento será seguidamente representado pela Figura 7.10, onde são apresentadas as poupanças energéticas para a estação de Verão.

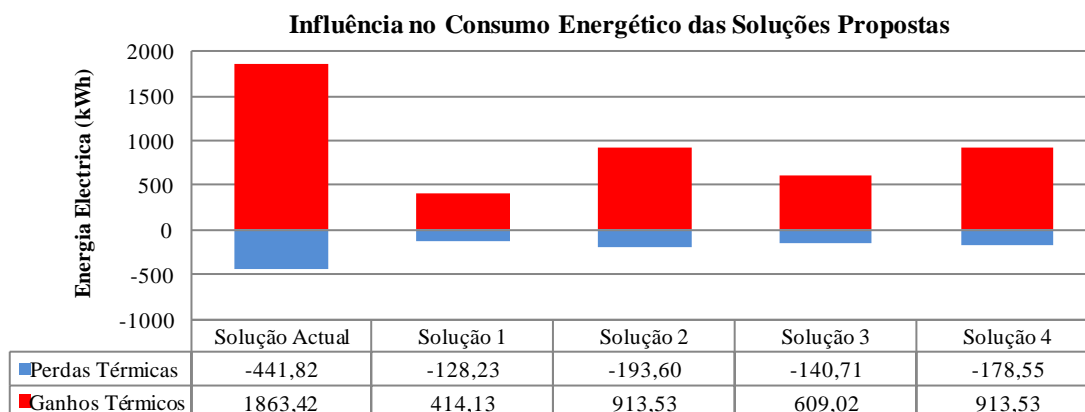


Figura 7.10 - Gráfico da influência no consumo energético – Reabilitação vãos envidraçados (Verão)

Como já foi anteriormente referido, na estação de aquecimento interessa promover as perdas térmicas, mas ainda mais importante é evitar os ganhos solares pelos vãos envidraçados, que são a principal fonte de sobreaquecimento das habitações.

A solução 1 reduz os ganhos térmicos em 76%, devido essencialmente ao factor solar associado ao vidro e a solução 2 é a que mais possibilita as perdas térmicas, no entanto, a melhor solução é a que estabelecer o melhor equilíbrio entre as perdas e ganhos térmicos. Esse aspecto pode ser verificado com a determinação das necessidades térmicas de aquecimento. Nessa perspectiva, apresenta-se na Figura 7.11 os resultados do  $N_{vc}$  referentes às soluções adoptadas.

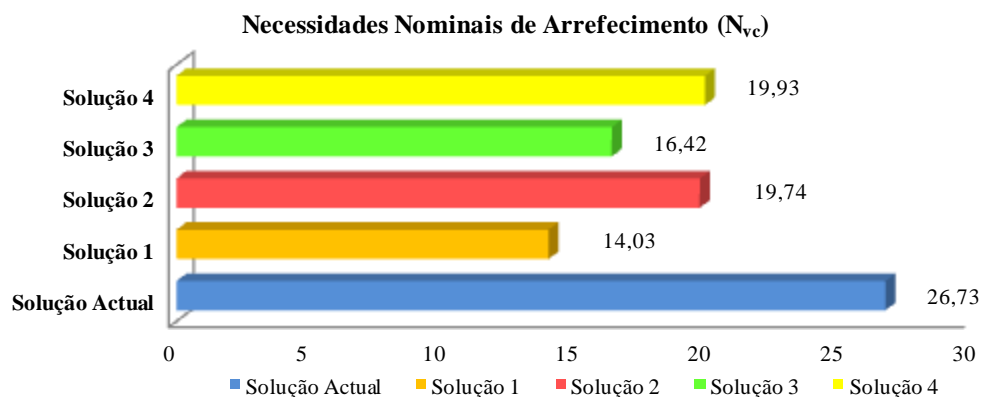


Figura 7.11 - Gráfico das necessidades nominais de arrefecimento – Reabilitação vãos envidraçados ( $N_{vc}$ )

A partir da análise do gráfico, verifica-se que a tomada de medidas de melhoramento dos vãos envidraçados promove a redução dos consumos na estação de arrefecimento. Os valores estimados representam reduções em cerca de 25% a 48% nas necessidades nominais para arrefecimento. Relativamente às soluções 2 e 4 verifica-se a partir da Figura 7.10 a existência de uma disparidade ao nível de ganhos em relação às perdas e conseqüentemente, os ganhos assumem valores significativos, aumentando assim a energia necessária para contrariar o efeito dos ganhos brutos, com repercussões negativas para o desempenho térmico da habitação. Por outro lado, o efeito da solução 1 destaca-se relativamente às restantes, tendo sido obtido um resultado inferior 48% face ao existente.

A partir da análise efectuada para ambas as estações, a reabilitação dos vãos envidraçados torna-se necessária na medida em que se estabelecem novos consumos ao ano, possibilitando uma poupança efectiva de energia que se traduz numa poupança monetária por parte do consumidor. No entanto, interessa não só perspectivar este tipo de medidas de reabilitação mas também torna-la sustentável, de modo a que se obtenham bons resultados energéticos a preços cujo período de retorno seja aceitável e atingível a curto/médio prazo.

Como já foi anteriormente referido, foram adoptados os princípios do período de retorno simples (8 anos) de acordo com o RSECE [22] no seu artigo 32.º. Nesta perspectiva foram realizados cálculos simples a partir da poupança efectiva de energia consumida que resultam dos resultados obtidos para ambas as estações a partir do custo unitário da energia de 0,10 € e a área de envidraçado (17,16 m<sup>2</sup>) correspondente. Foi então estimado o custo máximo de cada solução face à poupança anual, de modo a que o investimento inicial tenha um retorno passados 8 anos, os resultados são apresentados em seguida no Quadro 7.22.

Quadro 7.22 - Custo máximo para período de retorno até 8 anos – reabilitação vãos envidraçados

<b>Medidas Reabilitação</b>	<b>Redução Energética (kWh)</b>	<b>Poupança Monetária (€/ano)</b>	<b>Poupança Monetária (€/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Custo Máximo 8 anos (€/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Custo Máximo 10% Utilização (€/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Melhoria janelas 1</b>	2681,89	268,19	15,63	125,03	12,50
<b>Melhoria janelas 2</b>	2480,09	248,01	14,45	115,62	11,56
<b>Melhoria janelas 3</b>	2655,90	265,59	15,48	123,82	12,38
<b>Melhoria janelas 4</b>	2537,18	253,72	14,79	118,28	11,83

Como já foi anteriormente referido no caso do isolamento térmico das paredes, as reduções que aqui são apresentadas têm por base o princípio de que a habitação está permanentemente climatizada. Sabendo que apenas se considera uma utilização de 10% dos dispositivos de climatização durante as estações de aquecimento e arrefecimento, os períodos de retorno associados ao investimento aumentam para níveis considerados insustentáveis.

No sentido de estabelecer uma comparação ao nível dos preços estimados face ao que existe actualmente no mercado ao nível dos vãos envidraçados, foi realizada uma pesquisa onde resultaram os preços apresentados no Quadro 7.23. Os preços unitários são referentes à caixilharia de madeira e ao tipo de vidro considerado para cada solução proposta.

Quadro 7.23 - Preços unitários para vãos envidraçados (Fonte: Gerador de Preços – *Cype Ingenieros*)

Solução 1		Solução 2		Solução 3		Solução 4	
Elemento	€/m <sup>2</sup>	Elemento	€/m <sup>2</sup>	Elemento	€/m <sup>2</sup>	Elemento	€/m <sup>2</sup>
Caixilho	232,00	Caixilho	232,00	Caixilho	232,00	Caixilho	232,00
Vidro	74,44	Vidro	20,32	Vidro	59,33	Vidro	16,74

Os preços em cima referidos constituem preços aproximados referentes ao material (caixilharia + vidro), onde não estão contabilizados acessórios necessários à montagem dos elementos nem ao custo unitário de mão-de-obra. Ainda assim, conclui-se que a substituição dos vãos envidraçados, embora seja viável energeticamente, constitui um investimento que neste caso específico conduz a períodos de retorno entre os 168 e 196 anos, sendo claramente uma medida sem qualquer tipo de retorno financeiro face ao investimento inicial.

### 7.3.3. Propostas de Soluções Finais e Análise de Resultados

Um dos objectivos propostos no presente trabalho consiste em perspectivar um conjunto de melhorias à envolvente vertical do edifício “Gaioleiro”, nomeadamente no que diz respeito às paredes e vãos envidraçados da habitação do piso 2. Assim sendo e depois de avaliadas as medidas de reabilitação de forma isolada, pretende-se nesta secção conjugar as soluções previstas anteriormente para paredes e vãos envidraçados com vista à determinação da hipótese que melhor satisfaz os requisitos ao nível do consumo energético.

Nesse sentido, foi realizada uma simulação que consiste em verificar o nível de desempenho da habitação com as medidas de reforço do isolamento previstas em projecto, que correspondem à solução 1 para as paredes (P1) e solução 1 para vãos envidraçados (ENV1). As restantes soluções previstas nas secções 7.3.1 e 7.3.2 foram simuladas conjugando todas as combinações das três soluções possíveis para paredes e vãos envidraçados.

Quadro 7.24 - Combinação de soluções – Paredes e vãos envidraçados

Melhorias		Vãos Envidraçados			
		Solução 1 (ENV1)	Solução 2 (ENV2)	Solução 3 (ENV3)	Solução 4 (ENV4)
Paredes	Solução 1 (P1)	X	-	-	-
	Solução 2 (P2)	-	X	X	X
	Solução 3 (P3)	-	X	X	X
	Solução 4 (P4)	-	X	X	X

Para as combinações previstas foram estimadas as respectivas necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento cujos resultados são apresentados na Figura 7.12.

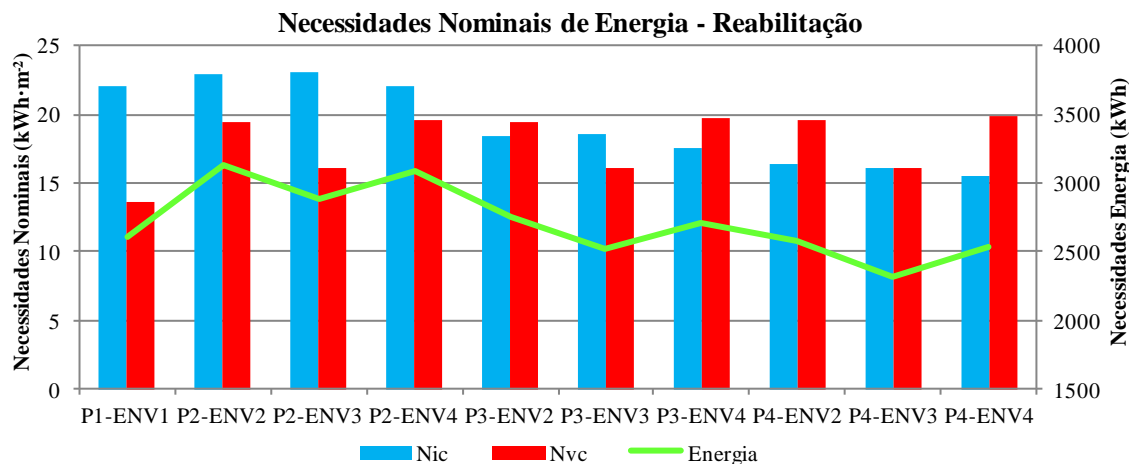


Figura 7.12 - Gráfico das necessidades energéticas - soluções de reabilitação

Da observação da Figura 7.12, verifica-se que a solução preconizada ao nível de projecto para a habitação estudada possui um comportamento muito aceitável que corresponde a um  $N_{ic}$  de 22,1 kWh·m<sup>-2</sup>·ano<sup>-1</sup> e um  $N_{vc}$  de 13,7 kWh·m<sup>-2</sup>·ano<sup>-1</sup>, com um gasto energético combinado de 2611 kWh, sendo a solução que melhores condições oferece na estação de arrefecimento devido em grande parte à contribuição do factor solar dos vidros, que reduz bastante os ganhos solares pelos envidraçados.

No que diz respeito às restantes soluções, ambas poderiam ser consideradas para uma intervenção de reabilitação a implementar na habitação, uma vez que apresentam resultados equilibrados para o Inverno e Verão, cumprindo largamente os limites estabelecidos na regulamentação [2]. Destaca-se no entanto como mais negativa a solução que consiste em combinar a solução 2 das paredes (P2) e a solução 2 dos envidraçados (ENV2), com um  $N_{ic}$  de 22,9 kWh·m<sup>-2</sup>·ano<sup>-1</sup> e um  $N_{vc}$  de 19,5 kWh·m<sup>-2</sup>·ano<sup>-1</sup> com um gasto energético total de 3131 kWh, constituindo assim um pico máximo de consumo de energia face às restantes soluções.

Por outro lado, a solução com melhores resultados é a relativa à solução 4 das paredes com a solução 3 dos vãos envidraçados, cujo  $N_{ic}$  é de 16,2 kWh·m<sup>-2</sup>·ano<sup>-1</sup> e o  $N_{vc}$  de 16,1 kWh·m<sup>-2</sup>·ano<sup>-1</sup>, o consumo combinado de energia situa-se nos 2310 kWh. Nesta solução destaca-se a espessura de isolamento térmico (0,09 m) aplicado na parede, associado a um vão envidraçado com vidro baixo emissivo.

Tendo por base as actuais necessidades nominais de aquecimento (66,23 kWh·m<sup>-2</sup>·ano<sup>-1</sup>) e arrefecimento (26,73 kWh·m<sup>-2</sup>·ano<sup>-1</sup>) da habitação, a aplicação combinada das melhorias previstas ao nível do isolamento térmico das paredes da envolvente e substituição dos vãos envidraçados, conduzem a reduções percentuais significativas do consumo energético, como é possível verificar no Quadro 7.25.

Quadro 7.25 - Redução do consumo energético da aplicação das medidas de melhoria (%)

	<b>P1 ENV1</b>	<b>P2 ENV2</b>	<b>P2 ENV3</b>	<b>P2 ENV4</b>	<b>P3 ENV2</b>	<b>P3 ENV3</b>	<b>P3 ENV4</b>	<b>P4 ENV2</b>	<b>P4 ENV3</b>	<b>P4 ENV4</b>
<b>N<sub>ic</sub></b>	66,7%	65,4%	65,3%	66,7%	72,2%	71,9%	73,5%	75,3%	75,6%	76,5%
<b>N<sub>vc</sub></b>	48,9%	27,2%	39,9%	26,5%	27,1%	40,0%	26,4%	26,5%	39,6%	25,8%

De uma forma geral, qualquer das opções consideradas para a reabilitação da habitação estudada, constituem soluções de elevada viabilidade energética, uma vez que se reduzem os gastos anuais de energia com aquecimento e arrefecimento. O emprego destas medidas garante o aumento da eficiência energética da habitação tendo repercussões no conforto térmico e na qualidade térmica do seu interior, contribuindo assim para um objectivo comum da redução dos consumos energéticos nos edifícios de habitação.

## 8. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 8.1. Conclusões Gerais

No presente trabalho pretendeu-se avaliar experimentalmente o comportamento térmico de uma habitação pertencente a um edifício “Gaioleiro” e comparar os resultados obtidos face aos valores correntemente adoptados no seu estudo. Função dos resultados obtidos e de um modelo térmico validado, foram avaliadas medidas com o objectivo de melhorar o seu nível de desempenho térmico.

No âmbito deste trabalho foi determinada experimentalmente a resistência térmica de paredes exteriores do edifício “Gaioleiro”. Nessa medição foi aplicado o método do fluxímetro, onde está implícito a utilização de um método médio de cálculo para tratamento de resultados [4]. Desta avaliação, determinou-se  $R = 0,53 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$  e  $\lambda_{eq.} = 1,38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  para a parede 1 (0,74 m) e  $R = 0,23 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$  e  $\lambda_{eq.} = 1,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  para a parede 2 (0,27 m). Quando calculados os coeficientes de transmissão térmica e comparados os resultantes dos valores de ensaio (ex.  $U = 1,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  para a parede de 0,74 m) e os preconizados por defeito (ex. parede de 0,74 m  $U = 1,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ), verifica-se que os últimos são em média 20% superiores aos estabelecidos experimentalmente.

No decurso desta avaliação experimental, para ser possível obter valores de  $R$  verificou-se ser necessário criar uma diferença de temperatura significativa entre o ambiente exterior e o interior da habitação, pois em regime livre (fase inicial dos ensaios) não foi possível satisfazer aos critérios de convergência do método. Efectivamente, apenas impondo uma diferença de temperatura significativa (neste caso de aproximadamente 9 °C), foi criado um fluxo de calor sensivelmente unidireccional. Foi também verificado que a resposta dos elementos opacos à variação das temperaturas impostas depende bastante da inércia térmica associada, uma vez que no caso estudado, e associado à capacidade de retenção de calor dos elementos que constituem a parede, tornou-se indispensável realizar uma correcção do fluxo de calor medido que atravessa as diferentes paredes estudadas.

A avaliação experimental das necessidades térmicas de aquecimento da habitação foi realizada para um período de 1,7 meses. No decurso do ensaio foram determinadas necessidades de aquecimento de 2504 kWh. Este valor foi comparado com as estimativas obtidas através de um modelo de cálculo em regime estacionário ISO 13790 [3] e RCCTE [2], com base nas características térmicas das paredes agora determinadas. Na validação do modelo térmico da habitação para as condições experimentais, revelou-se necessário estimar com precisão as perdas térmicas lineares através de uma análise bidimensional (*Therm*), bem como o efeito da alteração

das resistências térmicas superficiais interiores e exteriores, função das temperaturas existentes no decurso dos ensaios. Desta determinação resultaram resistências térmicas superficiais superiores em cerca de 40% face aos valores convencionais. No âmbito da campanha experimental também se revelou necessário introduzir o efeito dos ganhos de calor através das paredes, pois este efeito verificou-se que diminui em cerca de 21% as perdas térmicas totais pela envolvente opaca. Foi utilizado o valor da taxa de renovação de ar de  $1,4 \text{ h}^{-1}$ , determinado especificamente para as condições de ensaio [35]. Com estas considerações foi validado o modelo térmico da habitação para o período de ensaio de 1,7 meses, existindo uma diferença de 6,5% entre as necessidades de aquecimento medidas experimentalmente face às calculadas, o que se considerou aceitável face às incertezas associadas aos vários equipamentos nas diversas medições.

Posteriormente, esse modelo térmico validado foi ajustado para ser efectuada uma avaliação do edifício segundo os critérios definidos no RCCTE [2], num caso com os valores determinados experimentalmente neste trabalho e noutra caso com os valores convencionais (ITE54 [5]). Desta análise revelou-se, à semelhança do processo de validação do modelo térmico, uma mais valia da determinação com maior precisão do efeito das pontes térmicas lineares a partir de métodos de condução de calor bidimensional, onde se obtém uma diferença inferior de perdas lineares de 12% face ao método de cálculo convencional. No que diz respeito às necessidades térmicas de aquecimento, existe uma diferença entre os valores de ensaio e convencionais de 6%. Neste contexto foi avaliada a situação em que se considera uma temperatura interior de conforto de  $17 \text{ }^\circ\text{C}$  para determinação das necessidades de aquecimento, verificando-se que as necessidades energéticas são sensivelmente metade das determinadas com base na temperatura interior de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Estes resultados, baseados na percepção de conforto térmico dos Portugueses evidenciam a necessidade de ajustar a temperatura base para cálculo dos graus dia de aquecimento.

Da análise do modelo térmico da parede, evidencia-se o contributo dos ganhos solares na redução das necessidades de aquecimento mesmo na condição de se considerar a radiação solar com o respectivo sombreamento associado ao edifício, podendo traduzir-se numa redução de 9% das necessidades nominais de aquecimento ( $N_{ic}$ ) considerando o efeito das sombras existentes, ou mesmo de 15% se as paredes do edifício não se encontrassem sombreadas. Estes resultados evidenciam que este deve ser um aspecto a ter em conta no balanço térmico dos edifícios, mesmo no período de inverno.

Ao nível das necessidades de arrefecimento ( $N_{vc}$ ) não foram estimadas diferenças significativas entre essas duas abordagens para caracterizar o isolamento da envolvente (diferença de 1%), tendo sido encontrado um equilíbrio entre perdas e ganhos térmicos equivalentes utilizando os valores de ensaio e convencionais, estando de acordo com valores máximos admitidos  $N_v$ . Desta forma conclui-se que os valores convencionais de cálculo sendo conservativos, conduzem a uma sobre estimativa das perdas térmicas, podendo ser vantajoso a realização de ensaios no caso de

grandes reabilitações em edifícios com grandes áreas de vãos em contacto com o exterior. Nessa perspectiva os resultados obtidos evidenciam, mais uma vez, que para uma avaliação de propostas de reabilitação sustentável se devem adoptar valores específicos (valores de  $U$  e efeito das pontes térmicas lineares), bem como se conclui a necessidade de serem incluídos os ganhos solares pelas paredes na estação de aquecimento.

Face às elevadas perdas térmicas da habitação, foram realizadas estimativas do impacto do reforço do isolamento térmico da envolvente. Nesta perspectiva, foi avaliado o potencial associado à reabilitação do isolamento térmico dos vãos envidraçados e paredes da envolvente da habitação com base no valor estabelecido de  $R_{ph} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ .

Das soluções previstas ao nível do reforço térmico dos vãos envidraçados e paredes da envolvente, verificou-se que qualquer uma das medidas aplicadas de forma isolada seria suficiente para a habitação satisfazer ao limite de  $N_i$ , uma vez que se consegue reduzir as perdas térmicas associadas à envolvente. No que diz respeito ao  $N_v$ , as medidas que contemplam o isolamento térmico das paredes são de alguma forma prejudiciais para o consumo energético final comparativamente ao existente, aumentando o consumo em 10%, enquanto que a substituição dos vãos envidraçados tem um impacto positivo na avaliação final diminuindo o consumo entre 25% e 47%. Na prática, as intervenções nos vãos envidraçados permitem reduzir as necessidades nominais de aquecimento entre 35% a 40%, enquanto a intervenção nas paredes contribui para uma redução de 45% a 55%. Nas soluções finais consideradas (isolamento das paredes + reforço dos vãos envidraçados), obteve-se para a melhor proposta um  $N_{ic}$  de  $16,2 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}$  e um  $N_{vc}$  de  $16,1 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}$ , apresentando melhorias de 76% ( $N_{ic}$ ) e 40% ( $N_{vc}$ ) face ao existente. O desempenho térmico da habitação após a reabilitação, aproxima-se dos limites que possibilitam satisfazer as exigências das habitações designadas por *passivehouse* ( $15 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}$ ).

No que diz respeito à viabilidade económica das soluções apresentadas, verifica-se que para um período de retorno de 8 anos face ao custo da aplicação do material e à poupança efectiva de energia, considerando 10% da utilização dos equipamentos de climatização é uma meta impossível de alcançar. Os períodos de retorno associados são sempre largamente superiores a 8 anos, podendo chegar aos 98 anos no caso do isolamento da parede e aos 196 anos no caso dos vãos envidraçados. Ainda assim, a análise de propostas de reabilitação térmica deve ser encarada numa perspectiva de assegurar condições mínimas de conforto térmico e qualidade do ar (através do cumprimento de valores para indicadores de desempenho térmico) e não numa perspectiva de necessidades térmicas/viabilidade económica das soluções preconizadas.

Este trabalho representou desta forma, um contributo importante para complementar a informação térmica relativa aos edifícios antigos, particularizando os “Gaioleiros”. A reabilitação deste tipo de edificado constitui nos dias de hoje uma aposta de mercado, pelo que o conhecimento efectivo

do seu desempenho térmico e energético, e do nível de isolamento associado à envolvente opaca dos edifícios, decerto influenciará na tomada de decisões acerca de medidas de reabilitação, podendo ser privilegiadas e potenciadas as soluções construtivas existentes.

A reabilitação térmica no contexto de edifícios antigos, constitui uma oportunidade de corrigir erros que se cometeram inconscientemente no passado, oferecendo uma melhoria da qualidade térmica e das condições de conforto aos utilizadores, reduzindo assim as necessidades térmicas de aquecimento, arrefecimento e ventilação contribuindo para o objectivo estratégico mundial da redução das necessidades energéticas na reabilitação.

## **8.2. Sugestões de Trabalhos Futuros**

Na perspectiva de dar continuidade ao presente trabalho e com as ferramentas que aqui foram apresentadas, seria matéria de análise a determinação experimental das características térmicas das restantes paredes do edifício, bem como da cobertura e assim conseguir estimar com precisão o desempenho energético global associado ao edifício “Gaioleiro”.

No âmbito deste trabalho, o estudo foi realizado somente em condições de regime estacionário, pelo que a sua avaliação em regime dinâmico complementava aspectos que não foram possíveis aqui determinar face às limitações do modelo adoptado.

Uma vez que o edifício será alvo de uma grande reabilitação, seria de facto muito interessante poder repetir a campanha experimental levada a cabo no presente trabalho e verificar o comportamento da habitação depois do processo de reabilitação, determinando as poupanças efectivas no consumo de energia com as medidas tomadas e verificar também o comportamento térmico das paredes da envolvente.

## 9. BIBLIOGRAFIA

### 9.1. Referências Bibliográficas

1. DECRETO-LEI 40/90. **Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).**
2. DECRETO-LEI Nº 80/2006. **Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios - RCCTE.**
3. ISO 13790. **Energy Performance of Buildings - Calculation of Energy use for Space Heating and Cooling.** 2007.
4. ISO 9869. **Thermal insulation -- Building elements -- In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.** 1994.
5. SANTOS, P. D.; RODRIGUES, R. **ITE 54 - Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos Opacos de Edifícios.** Lisboa: LNEC, 2010.
6. LNEC. **Evolução das Tipologias Construtivas em Portugal**, 22 Abril 2005. Disponível em: <[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)>. Acesso em: 11 Março 2011.
7. CARDOSO, R.; LOPES, M.; BENTO, R. **Vulnerabilidade Sísmica de Edifícios Antigos de Alvenaria da Cidade de Lisboa.** Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, 2003.
8. SILVA, V. C. E. **Viabilidade Técnica de execução do "Programa Nacional de Redução da Vulnerabilidade Sísmica do Edificado"**. SPES e GeCorpa. Lisboa. 2001.
9. APPLETON, J. **Módulos do Curso Projectos de Reabilitação de Edifícios.** Lisboa: Appleton Square, 2008.
10. CÂMARA MUNICIPAL DE LISBOA. **Museu da Cidade**, 2008. Disponível em: <[www.museudacidade.pt](http://www.museudacidade.pt)>. Acesso em: 25 Setembro 2011.
11. APPLETON, J. **Reabilitação de Edifícios "Gaioleiros": Um Quarteirão em Lisboa.** Lisboa: Orion, 2005.
12. FRANÇA, J. A. **Lisboa Pombalina e o Iluminismo.** Bertrand, 1987.
13. LNEC. **Edifícios com estrutura de Alvenaria da Época Pombalina e Similares (1755 - 1880)**, 2005. Disponível em: <[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)>. Acesso em: 21 Março 2011.
14. RODRIGUES, T. F.; FERREIRA, O. A. **As Cidades de Lisboa e Porto na Viragem do Século XIX - Características da sua evolução demográfica: 1864-1930.** Porto: 1991.
15. FARINHA, M. B. **Edifícios Antigos - Slides da Disciplina de Reabilitação de Edifícios e**

- Monumentos.** Lisboa. 2009.
16. APPLETON, J. Lisboa Ameaçada - Contribuição para uma Política de Reabilitação da Cidade, Lisboa, 1996.
  17. CÂMARA MUNICIPAL DE LISBOA. **Plano Director Municipal - Regulamento Anotado.** Lisboa: CML, 2008.
  18. CÂMARA MUNICIPAL DE LISBOA. **Plano de Pormenor de Salvaguarda da Baixa Pombalina.** Lisboa: CML.
  19. GONÇALVES, H. et al. **Edifícios Solares Passivos em Portugal.** Lisboa: INETI, 1997.
  20. CAMELO, S. et al. **Manual de Apoio à Aplicação do RCCTE.** Lisboa: INETI, 2005.
  21. DECRETO-LEI 118/98. **Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios - RSECE.**
  22. DECRETO-LEI 79/2006. **Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios - RSECE.**
  23. ISOLANI, P. **Eficiência Energética nos Edifícios Residenciais.** Lisboa: Deco, 2008.
  24. DECRETO-LEI N.º. 78/2006. **Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior no Edifícios - SCE.**
  25. ADENE. **Guia da Eficiência Energética.** Adene - Agência para a Energia, 2010.
  26. BOWIE, R. **European Union - The New Directive on the energy Performance of buildings - Moving closer to Kyoto.** 2003. Disponível em: <<http://www.managenergy.net/download/r210.pdf>>. Acesso em: 21 Fevereiro 2011.
  27. COMISSÃO EUROPEIA. **Energia: Prioridade para a Europa.** Bruxelas: 2011.
  28. EDP. **Guia Prático da Eficiência Energética.** Sair da Casca, 2006.
  29. DGE. **Eficiência Energética nos Edifícios.** Direcção Geral da Energia - Ministério da Economia, 2002.
  30. DIÁRIO DA REPUBLICA, 1ª SÉRIE-N.º 97-20. Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética, Lisboa, 2008 Maio 20.
  31. COSTA, A. **Revisão da Directiva de Certificação Energética. Desafios e Passo que se Estão a Efectuar.** ADENE. Lisboa. 2010.
  32. ANSELMO, I.; NASCIMENTO, C. **Reabilitação Energética da Envolvente de Edifícios Residenciais.** Lisboa: DGGE/IP-3E, 2004.
  33. GONÇALVES, H.; GRAÇA, J. M. **Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal.** Lisboa: DGGE/IP-3E, 2004.
  34. PIEDADE, A. C. D.; BRAGA, A. M.; RODRIGUES, A. M. **Térmica de Edifícios.** Orion,

- 2009.
35. SILVA, F. **Caracterização Experimental e Numérica da Permeabilidade ao Ar da Envolvente e do Sistema de Ventilação de um Edifício "Gaioleiro"**. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa. 2011.
  36. ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2004. **Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta: ASHRAE, 2004.
  37. ASHAE. **Fundamentals 1997 Handbook**. Atlanta: ASHRAE, 1997.
  38. PINTO, A. **Características Térmicas de Vãos Envidraçados**. Lisboa: LNEC, 2006.
  39. MATIAS, L. **Desenvolvimento de um Modelo Adaptativo para a definição das Condições de Conforto Térmico em Portugal**. Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico. Lisboa. 2010.
  40. CASEMIRO, J. et al. **Temperaturas Exteriores de Projecto e Numero de Graus-Dias**. 2ª Edição. ed. Lisboa: LNEC, 1995.
  41. SANTOS, R. G. D. **Avaliação da Qualidade Térmica de Projectos de Edifícios de Habitação**. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia. Porto. 1989.
  42. INCROPERA et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**.
  43. LOUREIRO, E. **Transferência de Calor**. POLI/UPE.
  44. LYBERG, M. D. **Building Thermal Performance: Techniques for analysis auditing and monitoring**. Swedish: Institute for building Research, 1993.
  45. HART, J. M. **A practical guide for infra-red thermography for building surveys**. London: BRE Bookshop, 1991.
  46. AMARAL, M. **Sistemas de Ventilação Natural e Mistos em Edifícios de Habitação**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
  47. EN 13829. **Thermal Performance of Buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method (ISO 9972: 1996, modified)**. 2000.
  48. BAKER, P. **U-values and Traditional Buildings - Un situ measurements and their comparisons to calced values**. Scotland: Gasgow Caledonian University, 2011.
  49. RIBEIRO, P. **Avaliação do Comportamento Térmico de Edifícios de Habitação com Recurso a um Termofluxímetro**. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2009.
  50. SIMIONI, W. **Análise de Erros na Medição de Condutividade Térmica de Materias através do Método do Fluximétrico**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

51. TERRALEVIS. **Relatório de Trabalhos Arqueológicos - Prédio sito em Lisboa na rua Jardim do Tabaco nº 19 a 33**. Lisboa. 2009.
52. SANTOS, P. D.; RODRIGUES, R. **ITE50 - Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios**. Lisboa: LNEC, 2010.
53. EN 12524. **Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values**. 2000.
54. FARINHA, J. S. B.; REIS, A. C. D. **Tabelas Técnicas**. Edições Técnicas E.T.L, 1998.
55. RIBEIRO, M.; PEREIRA, A. **Medição da Condutibilidade Térmica de Materiais**. 2003.
56. ISO 6946. **Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method**. 2007.
57. MITCHELL, R.; KOHLER, C.; ARASTEH, D. **Therm 5.2 / Window 5.2 NFRC Simulation Manual**. Lawrence Berkeley National Laboratory. 2006.
58. EN ISO 13789. **Thermal Performance of Buildings - Transmission heat loss coefficient - Calculation method**. CEN. Brussels. 1999.
59. NP 1037-1. **Ventilação e Evacuação dos Produtos da Combustão dos Locais com Aparelhos a Gás - Parte 1: Edifícios de Habitação. Ventilação Natural**. IPQ. Monte da Caparica. 2002.
60. PINTO, A. **Comportamento Térmico de Caixilharia Exterior**. Lisboa: LNEC, 2002.
61. ASTM E230. **Standard Specification and Temperature - Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples**.
62. **Transferência de Calor**. Disponível em: <<http://labvirtual.eq.uc.pt>>. Acesso em: 14 Maio 2011.
63. LNEC. **Edifícios com Estrutura de Alvenaria tipo "Gaioleiro"**, 22 Abril 2005. Disponível em: <<http://www.lnec.pt>>. Acesso em: 12 Março 2011.

## 9.2. Bibliografia Consultada

- ADENE. **Perguntas & Respostas sobre a Certificação Energética de Edifícios Existentes no âmbito do RCCTE**. 2009.
- AFONSO, J. **Estudo do Comportamento Térmico de Edifícios Antigos**. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa. Monte de Caparica. 2009.
- ALBATICI, R.; TONELLI, A. M. **On site evaluation of U-value of Opaque Building Elements: a new methodology**. University of Trento. Italy. 2008.
- ANDERSON, B. **Conventions for U-Value Calculations**. BRE, 2006.

ASTM C177-10. **Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.** 2010.

ASTM C518-04. **Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Mean of the Heat Flow Meter Apparatus.** 2004.

BARROS, H. D. **Estudo e Avaliação das Componentes Térmicas na Utilização de Energia em Edifícios.** Universidade da Madeira. Funchal. 2009.

CUMUCO, M. et al. **A Method for the Experimental Evaluation *in Situ* of the Wall Conductance.** Italy: University of Calabria, 2005.

DECRETO-LEI N.º 107/2001. **Base das políticas e do Regime de Protecção e valorização do Património Cultural.**

DGGE. **Reabilitação Energética da Envolvente de Edifícios Residenciais.** Lisboa: DGGE/IP-3E, 2004.

FERREIRA, M. A **Eficiência Energética na Reabilitação de Edifícios.** Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2009.

FILÍPEZAK, R.; LYON, R. E. **Heat Flux Measurements in the OSU rate os Heat Release Apparatus.** USA. 2001.

FLÓRIDO, F. **Tipificação de Soluções de Reabilitação de Paredes de Madeira em Edifícios Antigos.** Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto. Porto. 2010.

FROTA, A.; RAMOS, S. **Manual de Conforto Térmico.** 5ª Edição. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GONÇALVES, H. A **Nova Regulamentação Térmica de Edifícios em Portugal.** Lisboa: INETI, 2004.

GOUVEIA, P. **Caracterização dos Impactes da Envolvente no Desempenho Térmico dos Edifícios.** Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa. 2008.

HARALAMBOPOULOS, D. A.; PAPARSENOS, G. F. **Assessing the Thermal Insulation of Old Buildings - The need for *in situ* spot measurements of thermal resistance and planar infrared thermography.** University of the Aegean. Greece. 1996.

JARDIM, F. **Proposta de Intervenção de Reabilitação Energética de Edifícios de Habitação.** Universidade do Minho - Escola de Engenharia, 2009.

LEE, S.; KATO, S. **Feasibility Study of *in situ* Measurement Method using Infrared Camera to Measure U-Value of Walls.** University os Tokyo. Japan. 2009.

LUO, C. et al. **Determining the Thermal Capacitance, Conductivity and the Convective Heat Transfer Coefficient of a Brick Wall by Annually Monitored Temperatures and Total Heat Fluxes.** Energy and Building, Australia, 2010.

MANIOGLU, G. et al. **Thermal Performance Of a Passive House: measurements and simulation.** ASHRAE. 2007.

PENA, A. **Análise do Comportamento Sísmico de um Edifício Pombalino.** Lisboa: Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

SANTOS, P. D. **Evolução das Soluções de Paredes Face a novas Exigências Regulamentares.** Lisboa: LNEC, 2007.

SANTOS, R. **Avaliação da Qualidade Térmica de Projectos de Edifícios de Habitação.** Porto: Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, 1989.

SOFIA, J. **Fundamentals of Thermal Resistance Measurement.** Analysis Tech. 1995.

STRACHAN, P.; NAKHI, A.; SANDERS, C. **Thermal Bridge Assessments.** Glasgow: University of Strathclyde.

TEIXEIRA, S.; TEIXEIRA, J. **Métodos Numéricos em Transferência de Calor.** Escola de Engenharia - Universidade do Minho. 2003.

## **ANEXOS**



## **ANEXO A – DESENHOS AUXILIARES**



## ANEXO B – CALIBRAÇÃO DOS APARELHOS DE MEDIDA

### I. Calibração dos Fluxímetros

Os fluxímetros são equipamentos de medição de fluxos, constituídos essencialmente por um conjunto de termopares confinados num disco de espessura reduzida, cuja principal função no âmbito do trabalho realizado é medição do fluxo de calor que atravessa o centro do disco.

Sendo estes equipamentos necessários à realização dos ensaios *in situ*, procedeu-se então à calibração dos dois fluxímetros em laboratório com o intuito de formular uma equação por intermédio de uma curva de calibração, onde fosse possível fazer corresponder as leituras realizadas pelo *datataker* em mV, a um resultado correspondente ao fluxo de calor cuja unidade é o  $W \cdot m^{-2}$ .

Para a realização da calibração dos fluxímetros, foi utilizado um equipamento de medição de fluxos de calor destinado à realização de ensaios de condutibilidade térmica de isolamentos, propriedade do Laboratório Nacional de Engenharia de Lisboa (LNEC). O equipamento é constituído por duas faces opostas, uma face quente e uma face fria, contendo também controladores de temperatura e medidores de fluxo internos em cada uma das faces, podendo entre as mesmas ser aplicado um material isolante (Figura B.1). O método de ensaio é conforme o descrito na norma ASTM C177-10 “guarded hot plate”.



Figura B.1 - Esquema do Método "Guarded Hot Plate" (Adaptado: ASTM C177-10)

O objectivo passou pela colocação dos fluxímetros a calibrar nas diferentes faces do equipamento (Figura B.2), utilizando um material cuja condutibilidade térmica fosse conhecida de modo a garantir que transferência de calor se processasse de forma controlada e que no final exista correspondência entre os fluxímetros associados ao equipamento e os fluxímetros a calibrar.

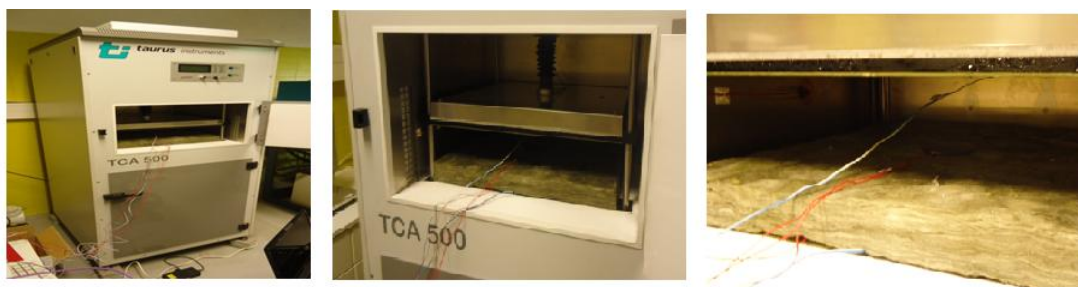


Figura B.2 - Processo de calibração dos fluxímetros

Foram utilizados para calibração dois materiais distintos com diferentes condutibilidades térmicas, de modo a obter dois pontos e assim traçar uma curva de calibração.

Os fluxímetros foram identificados para melhor entendimento pelas siglas 9\_+/- e 9\_\*/#, correspondentes à sua ligação ao datataker e colocados respectivamente na face fria e na face quente no equipamento de calibração. Os ensaios tiveram a duração de 2 horas e o regime estacionário foi atingido em ambos os casos depois de 1 hora, pelo que os valores médios utilizados serão relativamente à última meia hora de ensaio, onde os valores registados pelos fluxímetros correspondiam à linearidade de resultados pretendidos. Em todo o processo e em ambos os ensaios, o *datataker* foi configurado para realizar leituras de 5 em 5 segundos procedendo a médias a cada 5 minutos, o equipamento de calibração foi programado para realizar leituras também de 5 em 5 segundos e médias a cada minuto, sendo os resultados apresentados nos quadros que se seguem.

- **Lã de Ovelha**

Quadro B.1 - Resultados calibração dos fluxímetros - lã de ovelha

EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA				
Tempo (min)	Temperatura °C		Fluxo de Calor (W·m <sup>-2</sup> )	
	Zona Fria	Zona Quente	Zona Fria	Zona Quente
0	4,6	15,5	12,410	12,270
1	4,6	15,5	12,410	12,269
2	4,6	15,5	12,389	12,269
3	4,7	15,5	12,359	12,289
4	4,7	15,5	12,328	12,308
5	4,7	15,5	12,323	12,308
6	4,7	15,5	12,333	12,294
7	4,6	15,5	12,343	12,279
8	4,6	15,5	12,374	12,260
9	4,7	15,5	12,394	12,230
10	4,6	15,5	12,405	12,221
11	4,6	15,5	12,405	12,216
12	4,6	15,5	12,400	12,216
13	4,6	15,5	12,374	12,245
14	4,7	15,5	12,343	12,250
15	4,7	15,5	12,292	12,274
16	4,7	15,5	12,256	12,313
17	4,6	15,5	12,246	12,313
18	4,7	15,5	12,262	12,313
19	4,7	15,5	12,262	12,294
20	4,7	15,5	12,282	12,269
21	4,7	15,5	12,287	12,255
22	4,7	15,5	12,317	12,245
23	4,7	15,5	12,338	12,230
24	4,6	15,5	12,354	12,216
25	4,7	15,5	12,353	12,206
26	4,6	15,5	12,338	12,216
27	4,7	15,5	12,307	12,235
28	4,7	15,5	12,277	12,245
29	4,7	15,5	12,272	12,255
30	4,7	15,5	12,282	12,245

DATATAKER				
Tempo (min)	Temperatura °C		Fluxo de Calor (mV)	
	Zona Fria	Zona Quente	Zona Fria	Zona Quente
0	4,5	14,5	0,804	-0,824
5	4,5	14,6	0,800	-0,824
10	4,5	14,6	0,799	-0,821
15	4,5	14,6	0,798	-0,821
20	4,5	14,6	0,796	-0,818
25	4,5	14,6	0,798	-0,815
30	4,5	14,6	0,795	-0,814
35	4,5	14,6	0,797	-0,811
40	4,5	14,6	0,793	-0,815
45	4,4	14,5	0,794	-0,812
50	4,5	14,6	0,793	-0,814
55	4,5	14,6	0,789	-0,815
60	4,4	14,6	0,792	-0,811

- **Lã de Rocha**

Quadro B.2 - Resultados calibração dos fluxímetros - lã de rocha

EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA				
Tempo (min)	Temperatura °C		Fluxo de Calor ( $W \cdot m^{-2}$ )	
	Zona Fria	Zona Quente	Zona Fria	Zona Quente
0	4,8	15,5	8,548	8,139
1	4,8	15,6	8,553	8,138
2	4,8	15,5	8,589	8,119
3	4,8	15,6	8,625	8,085
4	4,8	15,6	8,645	8,060
5	4,8	15,6	8,630	8,075
6	4,8	15,6	8,604	8,094
7	4,8	15,6	8,579	8,114
8	4,8	15,6	8,579	8,124
9	4,8	15,6	8,615	8,104
10	4,8	15,5	8,630	8,085
11	4,8	15,6	8,625	8,080
12	4,8	15,5	8,604	8,095
13	4,8	15,6	8,579	8,123
14	4,8	15,6	8,553	8,143
15	4,8	15,5	8,579	8,138
16	4,8	15,6	8,594	8,114
17	4,8	15,6	8,589	8,114
18	4,8	15,6	8,563	8,128
19	4,8	15,6	8,538	8,158
20	4,8	15,6	8,538	8,153
21	4,8	15,5	8,584	8,129
22	4,8	15,5	8,615	8,095
23	4,7	15,5	8,620	8,085
24	4,7	15,5	8,625	8,085
25	4,8	15,5	8,610	8,090
26	4,8	15,5	8,615	8,090
27	4,8	15,5	8,651	8,066
28	4,8	15,5	8,671	8,046
29	4,8	15,5	8,671	8,046
30	4,7	15,5	8,646	8,066

DATATAKER				
Tempo (min)	Temperatura °C		Fluxo de Calor (mV)	
	Zona Fria	Zona Quente	Zona Fria	Zona Quente
0	4,3	14,7	0,521	-0,570
5	4,3	14,6	0,519	-0,563
10	4,4	14,6	0,523	-0,558
15	4,4	14,7	0,528	-0,553
20	4,4	14,7	0,531	-0,549
25	4,4	14,7	0,534	-0,548
30	4,5	14,7	0,536	-0,547
35	4,4	14,7	0,541	-0,543
40	4,4	14,7	0,541	-0,544
45	4,5	14,7	0,539	-0,546
50	4,5	14,8	0,539	-0,546
55	4,5	14,8	0,543	-0,542
60	4,5	14,8	0,534	-0,547

Através dos dados adquiridos do fluxo de calor, foi então realizada a média dos valores registados quer na zona quente, quer na zona fria relativos aos dois ensaios realizados com os diferentes materiais de isolamento.

Quadro B.3 - Resultados dos ensaios experimentais

Material	Fluxímetros			
	Zona Fria		Zona Quente	
	$\bar{q}_{-} \pm$		$\bar{q}_{+} \text{*/#}$	
	mV	$W \cdot m^{-2}$	mV	$W \cdot m^{-2}$
<b>Lã de Ovelha</b>	0,796	12,332	0,817	12,260
<b>Lã de Rocha</b>	0,538	8,603	0,545	8,103

A partir dos dados do Quadro B.3, é possível então traçar a curva de calibração correspondente a cada fluxímetro e para os diferentes materiais. Os resultados obtidos são como os demonstrados na Figura B.3.

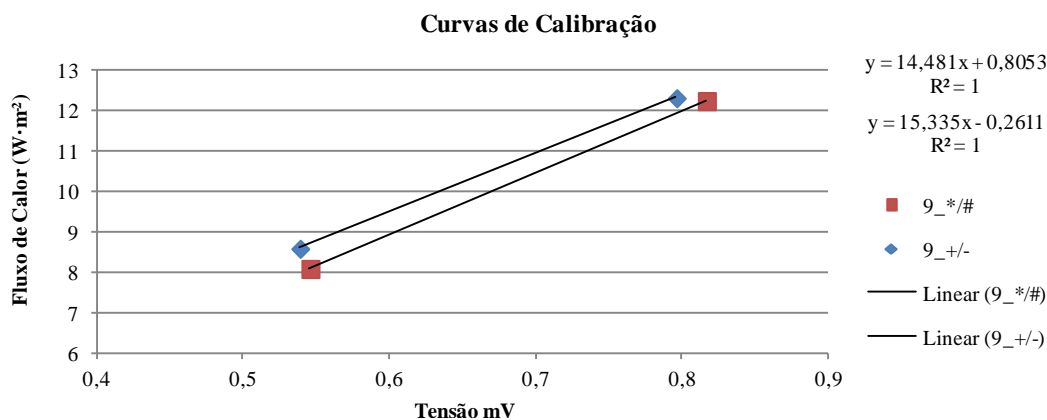


Figura B.3 - Gráfico das curvas de calibração dos fluxímetros

## II. Ensaio dos Sensores de Temperatura

Para a realização dos ensaios experimentais foram utilizados diversos sensores de temperatura durante um largo período de funcionamento, nesse sentido foi realizado um estudo que pretendeu aferir a boa calibração dos equipamentos na determinação das temperaturas. Este estudo passou essencialmente por criar um conjunto de condições devidamente controladas, ao longo do tempo, e verificar o comportamento dos diferentes equipamentos a mudanças de temperatura.

Os equipamentos foram então alvo de testes no departamento de calibração do LNEC, onde foi utilizada uma estufa para o efeito, o período de ensaio realizado foi aproximadamente 17 horas, com 3 níveis de temperatura ao longo do tempo (10 °C, 20 °C e 30 °C). A aquisição de dados foi realizada de minuto a minuto pelos equipamentos de medição da temperatura e os resultados estão apresentados na Figura B.4. Os resultados obtidos permitem verificar o seu correcto funcionamento, uma vez que respondem de igual modo às solicitações da temperatura criadas pela estufa estabelecendo os respectivos patamares de temperatura.

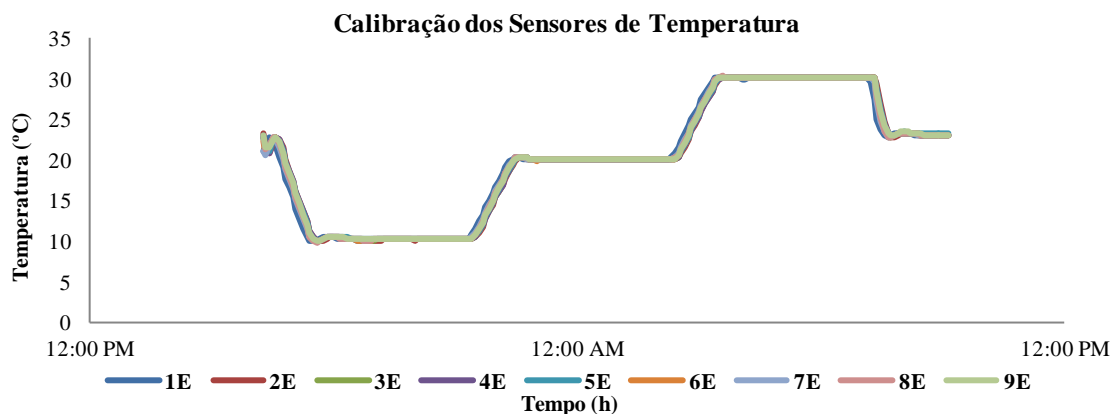


Figura B.4 - Calibração dos sensores de temperatura

## ANEXO C – TEMPERATURAS DAS HABITAÇÕES ENVOLVENTES

No âmbito do presente trabalho foi considerado que em condições normais, ou seja, sem alteração das condições de temperatura interior, não existem trocas de calor entre a habitação estudada (piso 2) e as habitações dos pisos 1 e 3. As habitações foram consideradas como espaços aquecidos de igual utilização, e como tal, a temperatura entre os interiores deve ser semelhante para que não se dê trocas de calor pelos elementos de separação.

No seguimento dos ensaios experimentais (7-05-2011 até 17-05-2011), foram medidas as temperaturas nos locais anteriormente referidos no sentido de suportar as opções tomadas no âmbito deste trabalho, os resultados são apresentados na forma de um gráfico na Figura C.1.

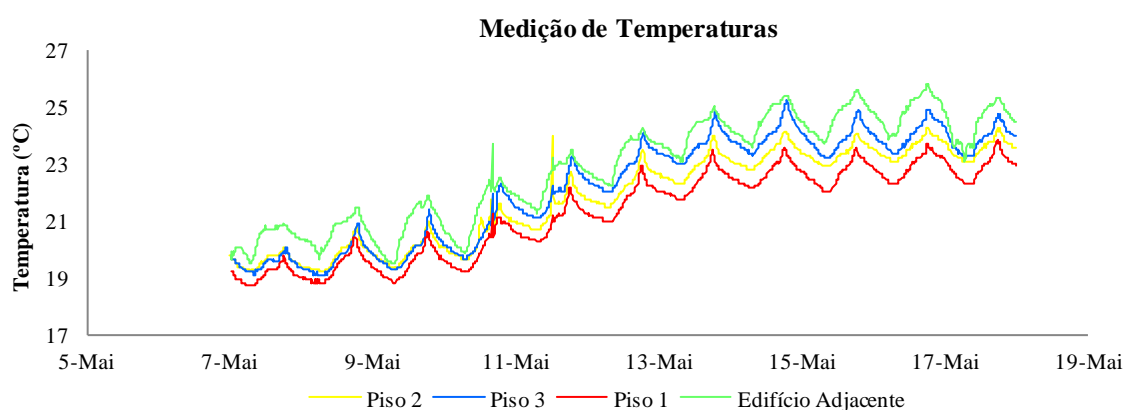


Figura C.1 - Medição das temperaturas em condições normais

Pela análise do gráfico depreende-se que o desenvolvimento das curvas é semelhante, no entanto, as temperaturas medidas no piso 2 situam-se num patamar intermédio relativamente às dos pisos e edifício adjacente, sendo importante quantificar a diferença média de temperaturas.

Dos dados experimentais recolhidos, foi estimada uma diferença de temperatura média entre a habitação do piso 2 e as restantes habitações ao longo do período dos 11 dias de ensaio. Tendo por base a temperatura de referência da habitação do piso 2 estudada, as diferenças são apresentadas no Quadro C.1.

Quadro C.1 - Diferenças de temperatura nas habitações adjacentes

Diferenças de Temperatura		
Piso 2 - 3	Piso 2 - 1	Piso 2 - Edf. Adjacentes
0,40 °C	0,55 °C	1,02 °C

Face aos resultados obtidos, os desvios médios da temperatura não se consideram suficientes para originar transmissões de calor entre a habitação do piso 2 e os espaços aquecidos adjacentes à habitação estudada.



## ANEXO D – AUXILIAR DE CÁLCULOS (MÉTODO DO FLUXÍMETRO)

O presente anexo pretende complementar a informação relativa aos resultados apresentados referentes ao capítulo 5 do presente trabalho, que visa a determinação experimental das características térmicas das paredes através do método do fluxímetro. Serão aqui apresentadas as listas de resultados provenientes dos ensaios experimentais e também resultados de cálculos intermédios que servem de base aos gráficos representados no referido capítulo.

### I. Determinação dos Factores de Massa Térmica (Fe/Fi)

Quadro D.1 - Cálculo dos factores de massa térmica – Parede 1 (0,74 m)

Determinação dos Factores de Massa Térmica - Parede 1 (0,74m)								
Camada	ek	Cond k	Rik	Rek	Rk	Ck	Fek	Fik
k	(m)	(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	(m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> )	(m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> )	(m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> )	(J·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )	(J·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )	(J·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )
1	0,0925	0,96	0,00	0,68	0,10	161.172	9.234	141.865
2	0,0925	0,96	0,10	0,58	0,10	161.172	24.344	106.609
3	0,0925	0,96	0,19	0,48	0,10	161.172	34.417	76.389
4	0,0925	0,96	0,29	0,39	0,10	161.172	39.454	51.206
5	0,0925	0,96	0,39	0,29	0,10	161.172	39.454	31.059
6	0,0925	0,96	0,48	0,19	0,10	161.172	34.417	15.949
7	0,0925	0,96	0,58	0,10	0,10	161.172	24.344	5.876
8	0,0925	0,96	0,68	0,00	0,10	161.172	9.234	839
<b>R</b>							<b>Fe</b>	<b>Fi</b>
0,77							214.896	429.792

Quadro D.2 - Cálculo dos factores de massa térmica – Parede 2 (0,27m)

Determinação do Factores de Massa Térmica - Parede 2 (0,27m)								
Camada	ek	Cond k	Rik	Rek	Rk	Ck	Fek	Fik
k	(m)	(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	(m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> )	(m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> )	(m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> )	(J·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )	(J·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )	(J·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )
1	0,034	0,93	0,00	0,26	0,04	57.499	3.294	50.611
2	0,034	0,93	0,04	0,22	0,04	57.499	8.685	38.033
3	0,034	0,93	0,07	0,18	0,04	57.499	12.278	27.252
4	0,034	0,93	0,11	0,15	0,04	57.499	14.075	18.268
5	0,034	0,93	0,15	0,11	0,04	57.499	14.075	11.081
6	0,034	0,93	0,18	0,07	0,04	57.499	12.278	5.690
7	0,034	0,93	0,22	0,04	0,04	57.499	8.685	2.096
8	0,034	0,93	0,26	0,00	0,04	57.499	3.294	299
<b>R</b>							<b>Fe</b>	<b>Fi</b>
0,29							76.666	153.331

## II. Determinação da Resistência Térmica (R) das Paredes

Quadro D.3 - Resultados experimentais diários parede 1 (0,74 m) - método do fluxímetro

RESULTADOS EXPERIMENTAIS - FLUXÍMETROS - TÉRMOPARES - SENSORES TEMPERATURA													
Dias Ensaio	Período	Dias	Mês	Pontos/dia	Tsi	Tse	Te	Ti	$\delta Te$ (°C)	$\delta Ti$ (°C)	Média (qi) Interior	Média (qe) Exterior	
				40670									
1	N	7	Maio	144	18,93	17,12	16,77	19,57			2,66	-1,32	
2		8		144	18,93	17,39	17,14	19,75	0,37	0,19	4,15	-2,19	
3		9		144	19,04	17,41	17,29	19,92	0,15	0,17	4,53	-2,47	
4		10		144	19,39	18,19	18,37	20,47	1,08	0,55	5,91	-4,29	
5		11		144	20,18	19,18	19,52	21,43	1,15	0,95	7,22	-4,43	
6		12		144	20,98	19,92	20,26	22,18	0,74	0,76	7,32	-4,23	
7		13		144	21,75	20,65	20,97	22,90	0,71	0,72	7,20	-3,98	
8		14		144	22,31	21,05	21,26	23,33	0,30	0,43	6,36	-3,27	
9		15		144	22,46	21,10	21,04	23,36	-0,22	0,03	5,12	-3,35	
10		16		144	22,69	21,45	21,42	23,58	0,37	0,22	5,18	-2,18	
11		17		144	22,79	21,24	21,01	23,54	-0,41	-0,04	4,09	0,30	
12		T		18	144	23,46	20,56	20,10	25,99	-0,91	2,45	7,50	2,70
13				19	144	25,67	20,54	19,99	30,11	-0,11	4,11	13,92	1,93
14		A		20	144	26,48	21,08	20,54	29,42	0,55	-0,68	13,75	2,50
15				21	144	27,16	21,32	20,61	30,08	0,07	0,66	13,63	3,51
16				22	144	27,11	21,10	20,19	29,68	-0,42	-0,40	11,64	5,16
17				23	144	27,38	21,86	21,23	30,05	1,04	0,36	12,59	2,70
18	24		144	27,73	22,71	22,27	30,31	1,03	0,27	12,75	1,68		
19	25		144	28,12	23,58	23,21	30,64	0,94	0,33	12,04	2,65		
20	26		144	28,18	23,12	22,23	30,58	-0,98	-0,06	9,60	6,15		
21	27		144	28,18	22,63	21,68	30,69	-0,55	0,11	9,91	4,53		
22	28		144	28,36	22,93	22,19	31,03	0,51	0,34	10,42	4,93		
23	29		144	28,30	22,22	21,36	30,86	-0,83	-0,17	9,95	5,69		
24	30		144	28,11	21,60	20,47	30,83	-0,89	-0,03	10,18	7,44		
25	31		144	27,89	21,00	19,84	30,64	-0,63	-0,19	10,72	5,88		
26	1		144	27,80	21,41	20,55	30,75	0,71	0,11	12,23	2,49		
27	2		144	27,87	21,40	20,51	30,88	-0,04	0,13	12,58	3,66		
28	3	144	28,06	22,16	21,37	31,03	0,86	0,15	12,94	2,91			
29	4	144	28,13	22,74	21,93	30,91	0,55	-0,13	11,72	3,55			
30	5	144	28,20	23,03	22,26	30,80	0,33	-0,11	11,33	3,81			
31	6	144	28,10	21,82	20,60	30,71	-1,66	-0,09	9,69	7,51			
32	7	144	27,71	20,75	19,41	30,36	-1,20	-0,35	9,56	7,79			
33	8	144	27,38	20,45	19,18	30,15	-0,23	-0,21	10,41	6,93			
34	9	144	26,99	20,46	19,33	29,71	0,15	-0,43	9,90	6,68			
35	10	144	27,17	20,93	19,81	30,25	0,49	0,53	12,74	5,28			
36	11	144	27,32	20,96	19,92	30,33	0,10	0,08	12,47	5,09			
37	12	144	27,43	21,14	20,11	30,45	0,20	0,12	12,74	5,12			
38	13	144	27,86	21,64	20,80	31,01	0,69	0,55	13,54	5,05			
39	14	144	28,05	22,00	21,12	30,99	0,32	-0,02	12,69	4,54			
40	15	144	27,93	22,17	21,33	30,77	0,22	-0,22	11,91	3,97			
41	16	144	28,10	22,17	21,21	30,98	-0,13	0,21	12,07	4,63			
42	17	144	28,07	22,15	21,17	30,84	-0,03	-0,13	11,47	4,50			
43	18	144	28,04	21,76	20,59	30,82	-0,59	-0,02	11,11	5,67			

Quadro D.4 - Determinação da resistência térmica (R) parede 1 (0,74 m) – método do fluxímetro

DETERMINAÇÃO DO R - PAREDE 1 (0,74 M)								
	Instante	Fluxo ( $\Sigma qi$ )	$\delta Te$	$\delta Ti$	Fluxo Corrigido ( $\Sigma qi'$ )	$\Sigma T_{sij}$	$\Sigma T_{sej}$	Cálculo R
1 - N	1	2,66	0,00	0,00	2,66	18,93	17,12	0,68
2 - N	2	4,15	0,37	0,19	2,30	18,93	17,39	0,67
3 - N	3	4,53	0,15	0,17	3,32	19,04	17,41	0,49
4 - N	4	5,91	1,08	0,55	0,47	19,39	18,19	2,57
5 - N	5	7,22	1,15	0,95	-0,39	20,18	19,18	-2,60
6 - N	6	7,32	0,74	0,76	1,73	20,98	19,92	0,61
7 - N	7	7,20	0,71	0,72	1,86	21,75	20,65	0,59
8 - N	8	6,36	0,30	0,43	3,49	22,31	21,05	0,36
9 - N	9	5,12	-0,22	0,03	5,52	22,46	21,10	0,25
10 - N	10	5,18	0,37	0,22	3,17	22,69	21,45	0,39
11 - N	11	4,09	-0,41	-0,04	5,29	22,79	21,24	0,29
12 - T	12	7,50	-0,91	2,45	-2,45	23,46	20,56	-1,18
13 - T	13	13,92	-0,11	4,11	-6,26	25,67	20,54	-0,82
14 - T	14	13,75	0,55	-0,68	15,78	26,48	21,08	0,34
15 - T	15	13,63	0,07	0,66	10,17	27,16	21,32	0,57
16 - T	16	11,64	-0,42	-0,40	14,68	27,11	21,10	0,41
17 - T	17	12,59	1,04	0,36	8,19	27,38	21,86	0,67
18 - T	18	12,75	1,03	0,27	8,85	27,73	22,71	0,57
19 - T	19	12,04	0,94	0,33	8,07	28,12	23,58	0,56
20 - T	20	9,60	-0,98	-0,06	12,34	28,18	23,12	0,41
21 - T	21	9,91	-0,55	0,11	10,72	28,18	22,63	0,52
22 - T	22	10,42	0,51	0,34	7,45	28,36	22,93	0,73
23 - T	23	9,95	-0,83	-0,17	12,88	28,30	22,22	0,47
24 - T	24	10,18	-0,89	-0,03	12,53	28,11	21,60	0,52
25 - T	25	10,72	-0,63	-0,19	13,25	27,89	21,00	0,52
26 - T	26	12,23	0,71	0,11	9,89	27,80	21,41	0,65
27 - T	27	12,58	-0,04	0,13	12,03	27,87	21,40	0,54
28 - T	28	12,94	0,86	0,15	10,04	28,06	22,16	0,59
29 - T	29	11,72	0,55	-0,13	10,97	28,13	22,74	0,49
30 - T	30	11,33	0,33	-0,11	11,04	28,20	23,03	0,47
31 - T	31	9,69	-1,66	-0,09	14,28	28,10	21,82	0,44
32 - T	32	9,56	-1,20	-0,35	14,27	27,71	20,75	0,49
33 - T	33	10,41	-0,23	-0,21	12,01	27,38	20,45	0,58
34 - T	34	9,90	0,15	-0,43	11,70	26,99	20,46	0,56
35 - T	35	12,74	0,49	0,53	8,87	27,17	20,93	0,70
36 - T	36	12,47	0,10	0,08	11,80	27,32	20,96	0,54
37 - T	37	12,74	0,20	0,12	11,64	27,43	21,14	0,54
38 - T	38	13,54	0,69	0,55	9,08	27,86	21,64	0,69
39 - T	39	12,69	0,32	-0,02	11,98	28,05	22,00	0,50
40 - T	40	11,91	0,22	-0,22	12,48	27,93	22,17	0,46
41 - T	41	12,07	-0,13	0,21	11,33	28,10	22,17	0,52
42 - T	42	11,47	-0,03	-0,13	12,22	28,07	22,15	0,48
43 - T	43	11,11	-0,59	-0,02	12,68	28,04	21,76	0,50

Quadro D.5 - Resultados experimentais diários parede 2 (0,27 m) - método do fluxímetro

RESULTADOS EXPERIMENTAIS - FLUXÍMETROS - TERMOPARES - SENSORES TEMPERATURA												
Dias de Ensaio	Período	Dias	Mês	Pontos/dia	Tsi	Tse	Te	Ti	$\delta T_e$	$\delta T_i$	Média (qi) Interior	Média (qe) Exterior
				40724								
1	A	30	Junho	144	25,82	23,52	23,17	30,82			13,26	4,69
2		1	Julho	144	26,58	24,33	23,91	30,79	0,74	-0,03	10,99	6,39
3		2		144	26,25	24,06	23,25	30,73	-0,66	-0,06	8,42	7,72
4		3		144	25,92	22,63	21,53	30,68	-1,72	-0,05	7,53	7,92
5		4		144	26,10	22,53	21,85	30,71	0,32	0,03	10,85	5,63
6		5		144	26,45	23,14	22,45	30,79	0,60	0,07	10,76	6,15
7		6		144	26,32	23,04	22,14	30,86	-0,31	0,07	9,16	7,32
8		7		144	25,76	22,13	21,15	30,75	-0,99	-0,10	9,80	7,28
9		8		144	25,95	22,38	21,57	30,70	0,41	-0,05	14,35	7,01
10		9		144	26,55	23,24	22,31	30,84	0,74	0,14	15,22	8,78
11		10		144	26,65	23,31	22,36	30,78	0,05	-0,06	14,84	8,79
12		11		144	26,53	23,12	22,11	30,77	-0,25	-0,01	14,65	9,24
13		12		144	26,55	23,04	21,87	30,82	-0,24	0,04	14,77	9,88
14		T		13	144	25,80	22,36	21,31	30,24	-0,56	-0,58	13,56
15	N	14		144	24,53	22,54	22,10	26,62	0,80	-3,62	8,68	4,91

Quadro D.6 - Determinação da resistência térmica (R) parede (0,27 m) – método do fluxímetro

DETERMINAÇÃO DO R - PAREDE 1 (0,27 M)								
	Instante	Fluxo $\sum q_i$	$\delta T_e$ (°C)	$\delta T_i$ (°C)	Fluxo Corrigido $\sum q_i'$	$\sum T_{sij}$	$\sum T_{sej}$	Cálculo R Interior
1 - A	1	13,26	0,00	0,00	13,26	25,82	23,52	0,17
2 - A	2	10,99	0,74	-0,03	10,39	26,58	24,33	0,22
3 - A	3	8,42	-0,66	-0,06	9,11	26,25	24,06	0,24
4 - A	4	7,53	-1,72	-0,05	9,13	25,92	22,63	0,36
5 - A	5	10,85	0,32	0,03	10,52	26,10	22,53	0,34
6 - A	6	10,76	0,60	0,07	10,10	26,45	23,14	0,33
7 - A	7	9,16	-0,31	0,07	9,31	26,32	23,04	0,35
8 - A	8	9,80	-0,99	-0,10	10,86	25,76	22,13	0,33
9 - A	9	14,35	0,41	-0,05	14,07	25,95	22,38	0,25
10 - A	10	15,22	0,74	0,14	14,31	26,55	23,24	0,23
11 - A	11	14,84	0,05	-0,06	14,91	26,65	23,31	0,22
12 - A	12	14,65	-0,25	-0,01	14,89	26,53	23,12	0,23
13 - A	13	14,77	-0,24	0,04	14,91	26,55	23,04	0,24
14 - T	14	13,56	-0,56	-0,58	15,08	25,80	22,36	0,23
15 - N	15	8,68	0,80	-3,62	14,40	24,53	22,54	0,14

## ANEXO E – CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA (U) ASSOCIADOS À DETERMINAÇÃO DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS

No presente anexo, pretende-se demonstrar a metodologia de cálculo adoptada para a determinação dos coeficientes de transmissão térmica associados às paredes da envolvente da habitação. Os valores aqui apresentados são correspondentes às condições de ensaio (30 °C) e condições normais (20 °C), para estes últimos são apresentados os valores dos coeficientes de transmissão térmica associados aos valores de ensaio e convencionais e os coeficientes de transmissão térmica relativos às melhorias implementadas. São também apresentados os valores dos coeficientes de transmissão térmica para os vãos envidraçados existentes.

De referir que os valores para as condutibilidades térmicas dos diferentes materiais são referentes aos valores de ensaio para as paredes e os valores convencionais adoptados no ITE50 [52], ITE54 [5] e EN 12524 [53] para outros elementos.

### I. Cálculo do U - Valores de Ensaio a Temperaturas de 30 e 20 °C

Quadro E.1 - Determinação dos coeficientes de transmissão térmica (U) ensaio

Parede Exterior - Fachada Norte				
Composição Parede	Espessura (e)	Condutibilidade Térmica ( $\lambda$ )	R = e/ $\lambda$	
Rse	-	-	0,040	0,040
Azulejo	0,005	1,300	0,004	0,004
Parede de Alvenaria	0,770	1,385	0,556	0,556
Rsi	-	-	0,220	0,130
-	0,775	Total =	0,820	0,730
<b>Temperatura</b>			<b>30°C</b>	<b>20°C</b>
U =			1,220	1,370

Parede Exterior - Fachada Norte				
Composição Parede	Espessura (e)	Condutibilidade Térmica ( $\lambda$ )	R = e/ $\lambda$	
Rse	-	-	0,040	0,040
Azulejo	0,005	1,300	0,004	0,004
Parede de Alvenaria	0,270	1,175	0,230	0,230
Rsi	-	-	0,220	0,130
-	0,275	Total =	0,494	0,404
<b>Temperatura</b>			<b>30°C</b>	<b>20°C</b>
U =			2,025	2,476

Parede Exterior - Fachada Sul				
Composição Parede	Espessura (e)	Condutibilidade Térmica ( $\lambda$ )	R = e/ $\lambda$	
Rse	-	-	0,040	0,040
Parede de Alvenaria	0,770	1,385	0,556	0,556
Rsi	-	-	0,220	0,130
-	0,770	Total =	0,816	0,726
<b>Temperatura</b>			<b>30°C</b>	<b>20°C</b>
U =			1,226	1,377

Parede Exterior - Fachada Sul				
Composição Parede	Espessura (e)	Condutibilidade Térmica ( $\lambda$ )	R = e/ $\lambda$	
Rse	-	-	0,040	0,040
Parede de Alvenaria	0,770	1,385	0,556	0,556
Azulejo	0,005	1,300	0,004	0,004
Rsi	-	-	0,220	0,130
-	0,770	Total =	0,820	0,730
			<b>Temperatura</b>	<b>30°C</b>
			U =	1,220
				1,370

Parede Exterior - Saguão				
Composição Parede	Espessura (e)	Condutibilidade Térmica ( $\lambda$ )	R = e/ $\lambda$	
Rse	-	-	0,080	0,040
Parede de Alvenaria	0,740	1,385	0,534	0,534
Rsi	-	-	0,220	0,130
-	0,740	Total =	0,834	0,704
			<b>Temperatura</b>	<b>30°C</b>
			U =	1,199
				1,420

Parede Exterior - Saguão				
Composição Parede	Espessura (e)	Condutibilidade Térmica ( $\lambda$ )	R = e/ $\lambda$	
Rse	-	-	0,080	0,040
Parede de Alvenaria	0,270	1,175	0,230	0,230
Rsi	-	-	0,220	0,130
-	0,270	Total =	0,530	0,400
			<b>Temperatura</b>	<b>30°C</b>
			U =	1,887
				2,501

Cantarias - Fachadas NO e SE				
Composição Parede	Espessura (e)	Condutibilidade Térmica ( $\lambda$ )	R = e/ $\lambda$	
Rse	-	-	0,040	0,040
Cantaria	0,200	1,100	0,182	0,182
Madeira	0,050	0,180	0,278	0,278
Rsi	-	-	0,220	0,130
-	0,200	Total =	0,720	0,630
			<b>Temperatura</b>	<b>30°C</b>
			U =	1,390
				1,588

Cantarias - Saguão				
Composição Parede	Espessura (e)	Condutibilidade Térmica ( $\lambda$ )	R = e/ $\lambda$	
Rse	-	-	0,080	0,040
Cantaria	0,200	1,100	0,182	0,182
Madeira	0,050	0,180	0,278	0,278
Rsi	-	-	0,220	0,130
-	0,250	Total =	0,760	0,630
			<b>Temperatura</b>	<b>30°C</b>
			U =	1,316
				1,588

<b>Parede Interior - Edifícios Adjacentes</b>			
<b>Composição Parede</b>	<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R = e/<math>\lambda</math></b>
Rsi	-	-	0,130
Parede de Alvenaria	1,500	1,385	1,080
Rsi	-	-	0,220
-	1,500	Total =	1,430
<b>Temperatura</b>			<b>30°C</b>
U =			0,700

<b>Parede Interior – Parede Tabique Caixa de Escadas</b>				
<b>Composição Parede</b>	<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R = e/<math>\lambda</math></b>	
Rsi	-	-	0,130	0,130
Madeira	0,150	0,180	0,410	0,410
Reboco		0,800		
Rsi	-	-	0,220	0,130
-	0,150	Total =	0,760	0,670
<b>Temperatura</b>			<b>30°C</b>	<b>20°C</b>
U =			1,316	1,490

<b>Parede Interior - Parede Frontal Caixa de Escadas</b>				
<b>Composição Parede</b>	<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R = e/<math>\lambda</math></b>	
Rsi	-	-	0,130	0,130
Parede de Alvenaria	1,500	1,170	0,170	0,170
Rsi	-	-	0,220	0,130
-	1,500	Total =	0,520	0,430
<b>Temperatura</b>			<b>30°C</b>	<b>20°C</b>
U =			1,920	2,070

<b>U Porta - Madeira Semi-densa</b>				
<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R</b>	<b>U</b>	<b>T</b>
0,040	0,180	0,222	1,748	30 °C
			2,074	20 C

## II. Cálculo do U - Valores Convencionais

<b>Parede Exterior - Fachada Norte</b>			
<b>Composição Parede</b>	<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R = e/<math>\lambda</math></b>
Rse			0,040
Azulejo	0,005	1,30	0,004
Reboco Exterior	0,025	0,80	0,030
Parede de Alvenaria	0,720	1,76	0,410
Reboco Interior	0,025	0,80	0,030
Rsi		0,22	0,130
	0,775	Total =	0,646
<b>Temperatura</b>			<b>20 °C</b>
U =			1,549

<b>Parede Exterior Pequena - Fachada Norte</b>			
<b>Composição da Parede</b>	<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R = e/<math>\lambda</math></b>
Rse (exterior)			0,040
Azulejo	0,005	1,30	0,004
Reboco Exterior	0,025	0,80	0,031
Parede de Alvenaria	0,220	1,76	0,125
Reboco Interior	0,025	0,80	0,031
Rsi (interior)			0,130
	0,275		Total = 0,362
			<b>Temperatura 20 °C</b>
			U = 2,766

<b>Parede Exterior - Fachada Sul</b>			
<b>Composição Parede</b>	<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R = e/<math>\lambda</math></b>
Rse			0,040
Reboco Exterior	0,025	0,80	0,030
Parede de Alvenaria	0,720	1,76	0,410
Reboco Interior	0,025	0,80	0,030
Rsi			0,130
	0,770		Total = 0,642
			<b>Temperatura 20 °C</b>
			U = 1,559

<b>Parede Exterior - Fachada Sul</b>			
<b>Composição Parede</b>	<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R = e/<math>\lambda</math></b>
Rse			0,040
Reboco Exterior	0,025	0,80	0,030
Parede de Alvenaria	0,720	1,76	0,410
Reboco Interior	0,025	0,80	0,030
Azulejo	0,005	1,30	0,004
Rsi			0,130
	0,775		Total = 0,646
			<b>Temperatura 20 °C</b>
			U = 1,549

<b>Parede Exterior - Saguão</b>			
<b>Composição Parede</b>	<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R = e/<math>\lambda</math></b>
Rse			0,040
Reboco Exterior	0,025	0,80	0,030
Parede de Alvenaria	0,690	1,76	0,390
Reboco Interior	0,025	0,80	0,030
Rsi			0,130
	0,740		Total = 0,625
			<b>Temperatura 20 °C</b>
			U = 1,601

<b>Parede Exterior Pequena - Saguão</b>			
<b>Composição Parede</b>	<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R = e/<math>\lambda</math></b>
Rse			0,040
Reboco Exterior	0,025	0,80	0,030
Parede de Alvenaria	0,220	1,76	0,130
Reboco Interior	0,025	0,80	0,030
Rsi			0,130
	0,270	Total =	0,358
		<b>Temperatura</b>	<b>20 °C</b>
		U =	2,797

<b>Cantarias - Fachadas NO / SE / Saguão</b>			
<b>Composição Parede</b>	<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R = e/<math>\lambda</math></b>
Rse			0,040
Cantaria	0,200	1,10	0,180
Madeira	0,050	0,18	0,280
Rsi			0,130
	0,200	Total =	0,630
		<b>Temperatura</b>	<b>20 °C</b>
		U =	1,588

<b>Parede Interior - Parede Tabique Caixa de Escadas</b>			
<b>Composição da Parede</b>	<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R = e/<math>\lambda</math></b>
Rsi (interior)	-	-	0,130
Madeira	0,150	0,180	0,410
Reboco		0,800	
Rsi (interior)	-	-	0,130
-	0,150	Total =	0,670
		<b>Temperatura</b>	<b>20 °C</b>
		U =	1,490

<b>Parede Interior - Parede Frontal Caixa de Escadas</b>			
<b>Composição Parede</b>	<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R = e/<math>\lambda</math></b>
Rsi	-	-	0,130
Reboco	0,025	0,8	0,030
Parede de Alvenaria	1,500	1,170	0,170
Reboco	0,025	0,8	0,030
Rsi	-	-	0,130
-	1,500	Total =	0,493
		<b>Temperatura</b>	<b>20 °C</b>
		U =	2,450

<b>U Porta - Madeira Semi-densa</b>				
<b>Espessura (e)</b>	<b>Condutibilidade Térmica (<math>\lambda</math>)</b>	<b>R</b>	<b>U</b>	<b>T</b>
0,040	0,180	0,222	2,074	20 C

### III. Cálculo U – Oportunidades de Melhoria

Apresentam-se em seguida os resultados referentes aos coeficientes de transmissão térmica associados às paredes alvo de reabilitação. Serão apresentados os resultados do cálculo efectuado para os diferentes isolamentos e diferentes espessuras consideradas, neste cálculo foi também considerado o efeito da radiação solar com o efeito das sombras nos paramentos exteriores. De referir que as paredes em contacto com edifícios adjacente foram alvo também alvo de reforço térmico, mas devido a não haver trocas de calor entre espaços não foram consideradas para os cálculos.

Quadro E.2 - Coeficientes de transmissão térmica - Reabilitação

Coeficientes de Transmissão Térmica - Paredes da Envolvente								
Elementos	Solução 1		Solução 2		Solução 3		Solução 4	
	c/ Sol + Sombras	s/ Sol	c/ Sol + Sombras	s/ Sol	c/ Sol + Sombras	s/ Sol	c/ Sol + Sombras	s/ Sol
Fachada NO - PG (0,775)	0,462	0,532	0,563	0,633	0,348	0,418	0,242	0,312
Fachada NO - PF (0,275)	0,510	0,643	0,664	0,797	0,351	0,484	0,215	0,348
Fachada SE - PG (0,77)	0,400	0,533	0,501	0,634	0,286	0,419	0,180	0,313
Fachada Saguão - PG (0,74)	-	0,539	-	0,643	-	0,423	-	0,315
Fachada Saguão - PF (0,27)	-	0,645	-	0,800	-	0,485	-	0,348
Cantarias - Fachadas NO	0,532	0,665	0,698	0,832	0,364	0,497	0,221	0,354
Cantarias - Fachadas SE	0,532	0,665	0,698	0,832	0,364	0,497	0,221	0,354
Cantarias - Saguão	-	0,665	-	0,832	-	0,497	-	0,354
Parede Interior Tabique	-	0,549	-	0,658	-	0,429	-	0,318
Parede Interior Frontal	-	0,632	-	0,781	-	0,478	-	0,345

### IV. Cálculo do U – Vãos Envidraçados

O cálculo dos coeficientes de transmissão térmica para os vãos envidraçados, foi realizado tendo em conta os materiais e as condições de temperatura a que esteve sujeita a habitação.

Relativamente aos valores obtidos, estes diferem quando a habitação está sujeita a diferentes condições de temperatura, devido às resistências térmicas superficiais calculadas para as condições experimentais e as convencionalmente adoptadas. Para as condições de ensaio com temperaturas próximas de 30 °C, o  $R_{si} = 0,22 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$  para toda a envolvente da habitação e em todos os compartimentos, por outro lado, o  $R_{se}$  toma o valor de  $0,04 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$  nas fachadas voltadas a Noroeste e a Sudeste, no caso concreto do saguão o valor é de  $0,08 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$  devido aos factores já explorados na secção 5.4.2. Nas condições normais que correspondem à temperatura de 20 °C, as resistências térmicas tomam os valores de  $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$  e  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ .

As características térmicas associadas aos materiais que constituem os vãos envidraçados, são conforme os apresentados no Quadro E.3.

Quadro E.3 - Características térmicas dos materiais - vãos envidraçados

Elemento	Condutibilidade ( $\lambda$ )	Espessura (e)	Resistência Térmica (R)	Sacada (%)	Peitoril (%)	WC (%)
Madeira semi-densa	0,18	0,03	0,167	50%	30%	-
Envidraçado	1,00	0,003	0,003	50%	70%	70%
Alumínio	230	0,04	0,0002	-	-	30%

Apresentam-se os coeficientes de transmissão térmica para os vãos envidraçados nas condições de ensaio no Quadro E.4.

Quadro E.4 - Coeficiente de transmissão térmica (30 °C) – Vãos Envidraçados

30°C	Sacada		Peitoril		Compartimento 7
Orientação	NO	SE	NO	Saguão	SE
$U_{\text{caixilharia}}$	2,34	2,34	2,34	2,14	3,85
$U_{\text{vidro}}$	3,80	3,80	3,80	3,30	3,80
$U_{\text{w médio}}$	3,07	3,07	3,36	2,95	3,81

Os coeficientes de transmissão térmica para os vãos envidraçados para a temperatura de 20 °C estão representados no Quadro E.5. De referir que no caso do saguão e mediante a existência de portada, o seu valor foi retirado directamente do ITE50 [52].

Quadro E.5 - Coeficiente de transmissão térmica (20 °C) – Vãos Envidraçados

20 °C	Sacada		Peitoril		Compartimento 7
Orientação	SE	NO	NO	Saguão	SE
$U_{\text{material}}$	2,97	2,97	2,97	-	5,88
$U_{\text{vidro}}$	5,78	5,78	5,78	-	5,78
$U_{\text{w médio}}$	4,38	4,38	4,94	3,90	5,81



## ANEXO F – VALORES DE MASSA TÉRMICA UTILIZADA NO CÁLCULO DA INÉRCIA TÉRMICA DA HABITAÇÃO

No presente anexo, serão apresentados os valores das massas térmicas correspondentes aos elementos construtivos que contribuem para a inércia térmica da habitação, determinados com base no ITE50 [52], ITE54 [5] e EN 12524 [53] e tabelas técnicas [54].

### I. Cálculo da Inércia Térmica s/ Isolamento

Quadro F.1 - Determinação da massa térmica dos elementos da parede - Condições actuais

Envolvente Exterior					
Elemento	Áreas	Peso Kg·m <sup>-2</sup>	Msi	r	A·Msi·r
NO - Parede (0,775m)	11,05	1442,1	150,0	1,0	1657,8
NO - Parede (0,275m)	1,32	531,3	150,0	1,0	198,4
SE - Parede (0,77m)	10,07	1386,0	150,0	1,0	1510,2
SE - Parede (0,775m)	2,56	1442,1	150,0	1,0	383,4
SE - Parede (0,775m)	3,12	1442,1	150,0	1,0	467,8
Saguão - Parede (0,74m)	3,17	1332,0	150,0	1,0	475,2
Saguão - Parede (0,27)	1,32	475,2	150,0	1,0	198,4
Cantarias - NO	1,08	553,9	150,0	1,0	162,0
Cantarias - SE	0,82	553,9	150,0	1,0	122,4
Cantarias - Sag	0,26	553,9	150,0	1,0	39,6

Envolvente Interior					
Elemento	Áreas	Peso Kg·m <sup>-2</sup>	Msi	r	A·Msi·r
Tabique	12,72	137,7	137,7	1,0	1751,0
Porta	5,96	3,2	3,2	1,0	19,4
Cozinha	8,55	475,2	150,0	1,0	1282,5
Fachada Este	31,98	2700,0	150,0	1,0	4797,0
Cozinha	10,08	2700,0	150,0	1,0	1512,0
Saguão	5,34	2700,0	150,0	1,0	801,0

Pavimento					
Elemento	Áreas	Peso Kg·m <sup>-2</sup>	Msi	r	A·Msi·r
Pavimento	75,45	60,0	60,0	0,75	3395,2
Tecto	75,45	60,0	60,0	0,75	3395,2

Paredes Interiores de Separação de Compartimentos						
Compartimento	Áreas	Peso Kg·m <sup>-2</sup>	Msi	r	A·Msi·r	
1	2	12,30	137,7	137,7	1,0	1693,2
2	3	12,30	137,7	137,7	1,0	1693,2
3	4	10,08	475,2	300,0	1,0	3024,0
4	5	10,08	475,2	300,0	1,0	3024,0
4	6	10,80	137,7	137,7	1,0	1486,7
5	7	10,05	137,7	137,7	1,0	1383,5
7	8	10,08	137,7	137,7	1,0	1387,6

## II. Cálculo Inércia Térmica c/ Isolamento Térmico

Quadro E.2 - Determinação da massa térmica dos elementos da parede – Reabilitação

<b>Envolvente Exterior</b>					
<b>Elemento</b>	<b>Áreas</b>	<b>Peso Kg·m<sup>-2</sup></b>	<b>Msi</b>	<b>r</b>	<b>A·Msi·r</b>
NO - Parede (0,775m)	11,05	9,0	9,0	1,0	99,5
NO - Parede (0,275m)	1,32	9,0	9,0	1,0	11,9
SE - Parede (0,77m)	10,07	9,0	9,0	1,0	90,6
SE - Parede (0,775m)	2,56	9,0	9,0	1,0	23,0
SE - Parede (0,775m)	3,12	9,0	9,0	1,0	28,1
Saguão - Parede (0,74m)	3,17	9,0	9,0	1,0	28,5
Saguão - Parede (0,27)	1,32	9,0	9,0	1,0	11,9
Cantarias - NO	1,08	9,0	9,0	1,0	9,7
Cantarias - SE	0,82	9,0	9,0	1,0	7,3
Cantarias - Sag	0,26	9,0	9,0	1,0	2,4

<b>Envolvente Interior</b>					
<b>Elemento</b>	<b>Áreas</b>	<b>Peso Kg·m<sup>-2</sup></b>	<b>Msi</b>	<b>r</b>	<b>A·Msi·r</b>
Tabique	12,72	9,0	9,0	1,0	114,5
Porta	5,96	9,0	9,0	1,0	53,7
Cozinha	8,55	9,0	9,0	1,0	76,9
Fachada Este	31,98	9,0	9,0	1,0	287,8
Cozinha	10,08	9,0	9,0	1,0	90,7
Saguão	5,34	9,0	9,0	1,0	48,1

<b>Pavimento</b>					
<b>Elemento</b>	<b>Áreas</b>	<b>Peso Kg·m<sup>-2</sup></b>	<b>Msi</b>	<b>r</b>	<b>A·Msi·r</b>
Pavimento	75,45	60,0	60,0	0,75	3395,2
Tecto	75,45	60,0	60,0	0,75	3395,2

<b>Paredes Interiores</b>						
<b>Compartimentos</b>		<b>Áreas</b>	<b>Peso Kg·m<sup>-2</sup></b>	<b>Msi</b>	<b>r</b>	<b>A·Msi·r</b>
1	2	12,30	137,7	137,7	1,0	1693,2
2	3	12,30	137,7	137,7	1,0	1693,2
3	4	10,08	475,2	300,0	1,0	3024,0
4	5	10,08	475,2	300,0	1,0	3024,0
4	6	10,80	137,7	137,7	1,0	1486,7
5	7	10,05	137,7	137,7	1,0	1383,5
7	8	10,08	137,7	137,7	1,0	1387,6

## ANEXO G – INFLUÊNCIA SOLAR NA ENVOLVENTE EXTERIOR E FACTORES DE SOMBREAMENTO

### I. Influência do Sol para o Período de Ensaio

No âmbito do ensaio experimental realizado para caracterizar experimentalmente o desempenho energético de uma habitação do edifício “Gaioleiro”, procurou-se determinar a radiação solar que incidiu nos vãos envidraçados em ambas as fachadas e a radiação que passou para o interior sob a forma de calor, no período de ensaio considerado. Nesse sentido, são aqui apresentados gráficos relativos à radiação que incide directamente nos envidraçados da habitação a Sudeste (medida) e a Noroeste (estimada) e passa para o seu interior (Figura G.1) e a radiação que incide directamente nas fachadas a Sudeste e Noroeste para o período em que foi realizado o ensaio (Figura G.2).

Os valores aqui apresentados são relativos a médias horárias da radiação medida na fachada a Sudeste pelo piranómetro e a estimada a Noroeste com base no *Soltherm* e de acordo com a equação 6.8.

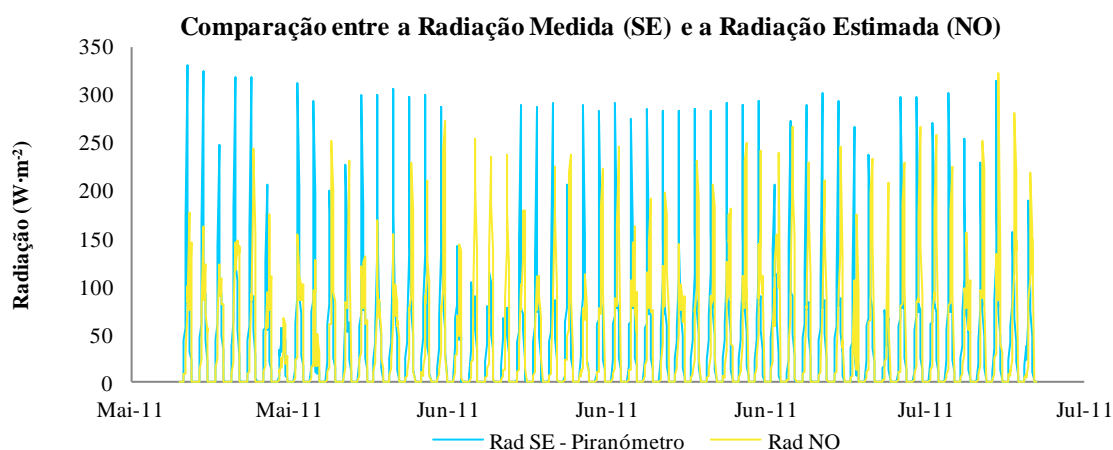


Figura G.1 – Radiação incidente no interior da habitação medida (SE) e estimada (NO)

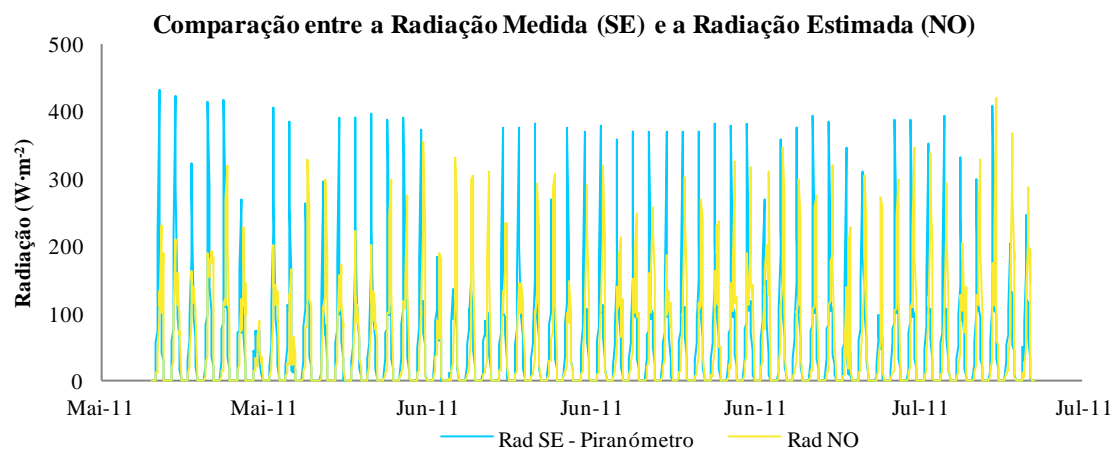


Figura G.2 - Radiação incidente na fachada medida (SE) e a radiação estimada (NO)

## II. Obstruções na Envolvente do Edifício Estudado

As obstruções encontradas na envolvente do edifício, têm influência na captação de energia solar por parte da habitação estudada. O edifício está confinado entre dois outros edifícios com empenas mais compridas na fachada a Sudeste e na fachada Noroeste possui um edifício em frente. É ainda de salientar que existe também em ambas as fachadas uma pequena contribuição para o sombreamento através das varandas pertencentes ao piso superior.

A descrição das obstruções foi realizada exaustivamente no corpo do trabalho pelo que no presente anexo serão apresentadas as figuras elucidativas e os quadros relativos à determinação do factor de obstrução.

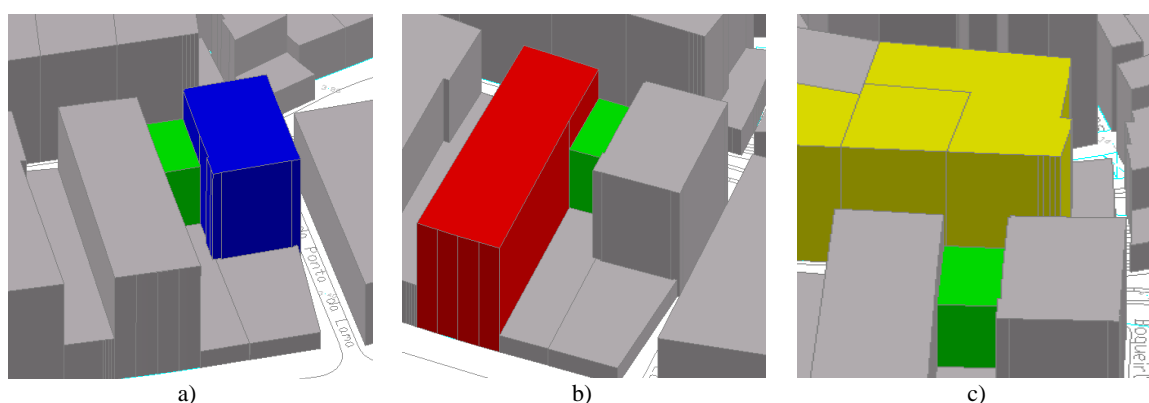


Figura G.3 – Principais obstruções ao edifício em estudo: a) Obstrução esquerda; b) Obstrução direita; c) Obstrução do horizonte

As obstruções ilustradas na Figura G.3, resultam em factores de obstrução que podem ser determinados a partir do RCCTE [2] para as diferentes estações do ano e servem de referência para o cálculo dos ganhos solares na estação de aquecimento e de arrefecimento. Os ângulos entre os vãos envidraçados e as obstruções são conforme ilustrado na Figura G.4.

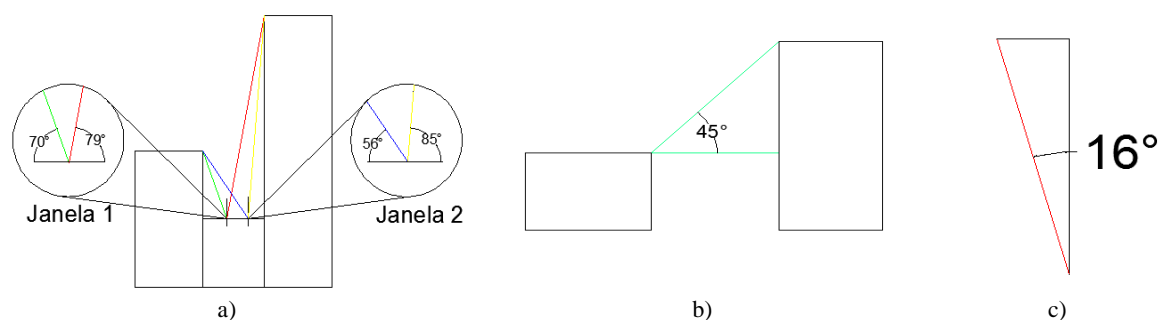


Figura G.4 - Ângulos do factor de sombreamento: a) Elementos verticais ( $F_f$ ); b) Elementos do horizonte ( $F_h$ ); c) Elementos horizontais ( $F_o$ )

Das obstruções calculadas, resultam os factores de sombreamento ( $F_s$ ), para as estações de aquecimento (Quadro G.1) e arrefecimento (Quadro G.2).

Quadro G.1 - Cálculo do factor de obstrução - Estação de Aquecimento ( $N_{ic}$ )

Referência Vão	Fh ( $\alpha$ )	Factor Horizonte (Fh)	Fo ( $\alpha$ )	Factor Horizontal (Fo)	Ff( $\beta$ ) esq.	Factor Vertical (Ff)	Ff( $\beta$ ) drt.	Factor Vertical (Ff)	Factor de Obstrução (Fs)
Sacada_1_NO	44,10	0,80	16,16	0,97	0,00	1,00	1,00	1,00	0,78
Sacada_2_NO	44,10	0,80	16,16	0,97	0,00	1,00	1,00	1,00	0,78
Peitoril_1_NO	44,10	0,80	16,16	0,97	0,00	1,00	1,00	1,00	0,78
Sacada_1_SE	0,00	1,00	16,16	0,86	70,00	0,91	79,42	0,93	0,73
Sacada_2_SE	0,00	1,00	16,16	0,86	55,82	0,79	85,25	0,79	0,54
WC_SE	-	-	-	-	-	-	-	-	0,27
Peitoril_1_Saguão	-	-	-	-	-	-	-	-	0,27

Quadro G.2 - Cálculo do factor de obstrução - Estação de Arrefecimento ( $N_{ic}$ )

Referência Vão	Fh ( $\alpha$ )	Factor Horizonte (Fh)	Fo ( $\alpha$ )	Factor Horizontal (Fo)	Ff( $\beta$ ) - esq.	Factor Vertical (Ff)	Ff( $\beta$ ) - drt.	Factor Vertical (Ff)	Factor de Obstrução (Fs)
Sacada_1_NO	44,10	1,00	16,16	0,93	0,00	1,00	1,00	1,00	0,93
Sacada_2_NO	44,10	1,00	16,16	0,93	0,00	1,00	1,00	1,00	0,93
Peitoril_1_NO	44,10	1,00	16,16	0,93	0,00	1,00	1,00	1,00	0,93
Sacada_1_SE	0,00	1,00	16,16	0,84	70,00	0,93	79,42	0,77	0,60
Sacada_2_SE	0,00	1,00	16,16	0,84	55,82	0,94	85,25	0,77	0,61
WC_SE	-	-	-	-	-	-	-	-	0,27
Peitoril_1_Saguão	-	-	-	-	-	-	-	-	0,27

Para o caso específico da contribuição da radiação solar nas paredes da envolvente exterior durante o período de aquecimento, foi necessário determinar as obstruções no sentido de corrigir a radiação proveniente do ano climático de referência para o período de Inverno na cidade de Lisboa. As obstruções para as fachadas Sudeste são representadas na Figura G.5, para a fachada Noroeste as obstruções são conforme a Figura G.4 b) e c).

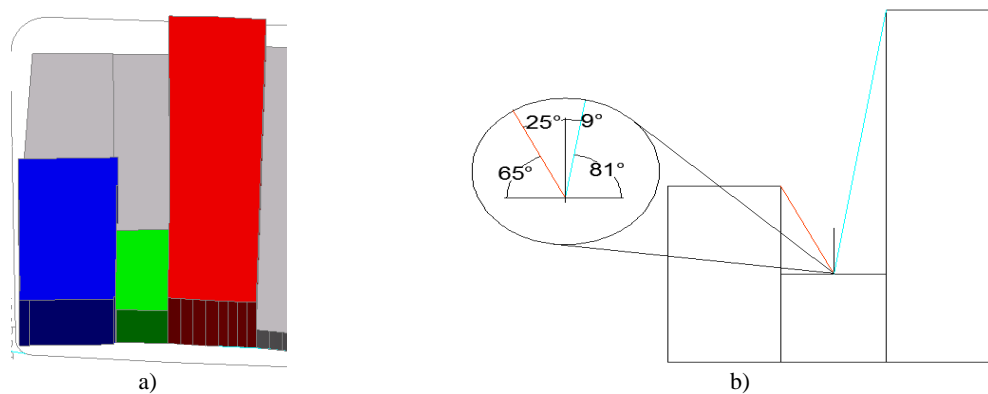


Figura G.5 - Ângulos das palas verticais (Ff)

### III. Influência do Sol na Estação de Aquecimento

Tendo em conta o potencial de redução de perdas térmicas associada à influência do sol, procurou-se determinar a sua influência nas fachadas em contacto com o exterior da habitação para o período de Inverno. Com base nas obstruções existentes e também no efeito produzido sem as referidas obstruções, as radiações incidentes nas paredes de fachada são dados em forma de gráficos representados na Figura G.6 e Figura G.8.

Foi também estimado o potencial de redução de energia associada à contribuição do sol nas paredes de fachada através do método dinâmico de condução de calor e os resultados obtidos são apresentados nos gráficos da Figura G.7 e Figura G.9.

No caso da determinação da contribuição do sol para o período de Inverno, o valor da radiação solar e as temperaturas consideradas a partir dos dados do ano climático de referência, diferem um pouco dos resultados apresentados no RCCTE ( $GD = 1190 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{dia}$ ), sendo o número de graus dia correspondentes igual a  $1890 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{dia}$ . A radiação incidente também difere ligeiramente dos valores considerados no regulamento, de  $108 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mês}^{-1}$  para  $93,14 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mês}^{-1}$  nos 5,3 meses considerados para o Inverno. Assim sendo, as perdas das paredes foram ajustadas tendo em conta esta situação e foi então possível realizar a comparação entre o cálculo estático e dinâmico no sentido de aferir a diferença existente entre resultados e com isso estimar o efeito do sol nas paredes que se traduz numa redução do coeficiente de transmissão térmica.

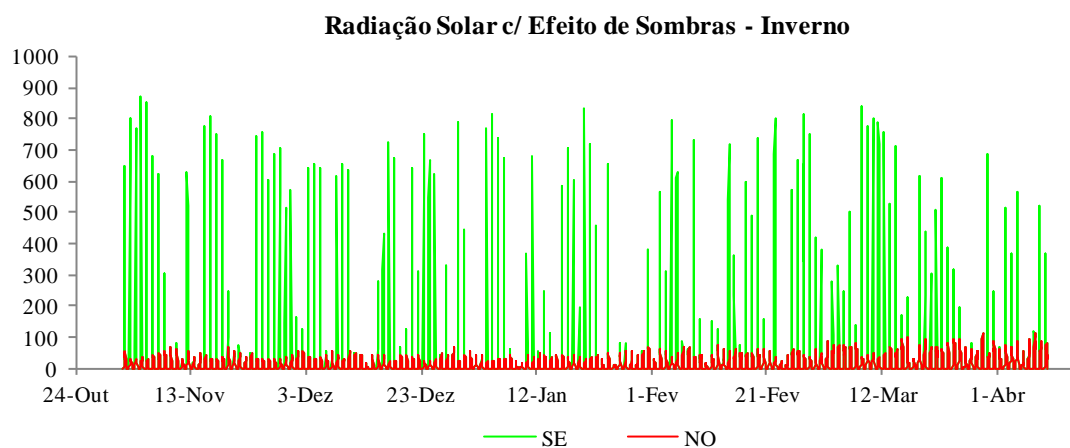


Figura G.6 - Gráfico da radiação solar c/ efeito das sombras - Inverno

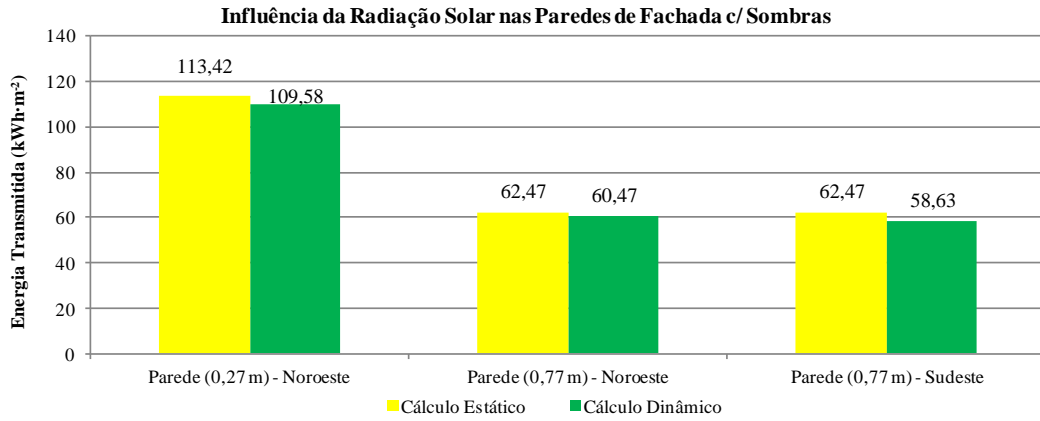


Figura G.7 – Gráfico da influência da radiação solar nas paredes de fachada c/sombra

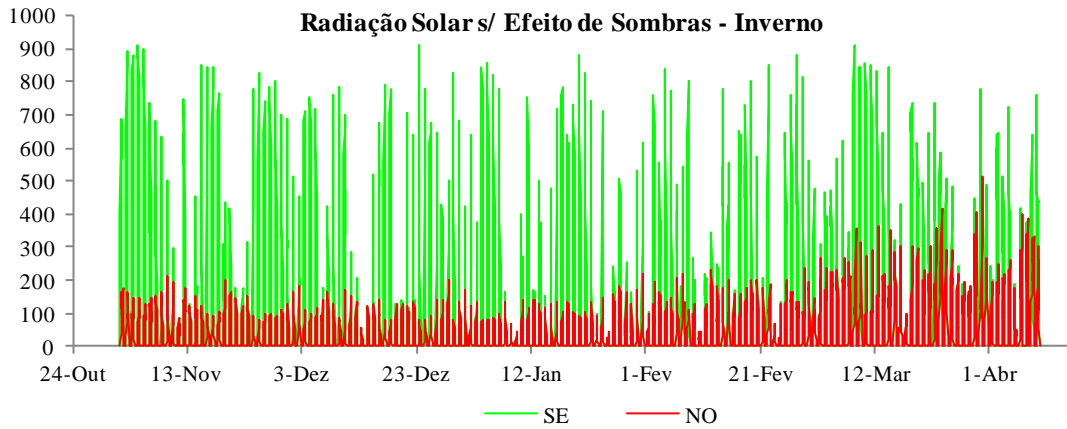


Figura G.8 - Gráfico da radiação solar s/ efeito das sombras – Inverno

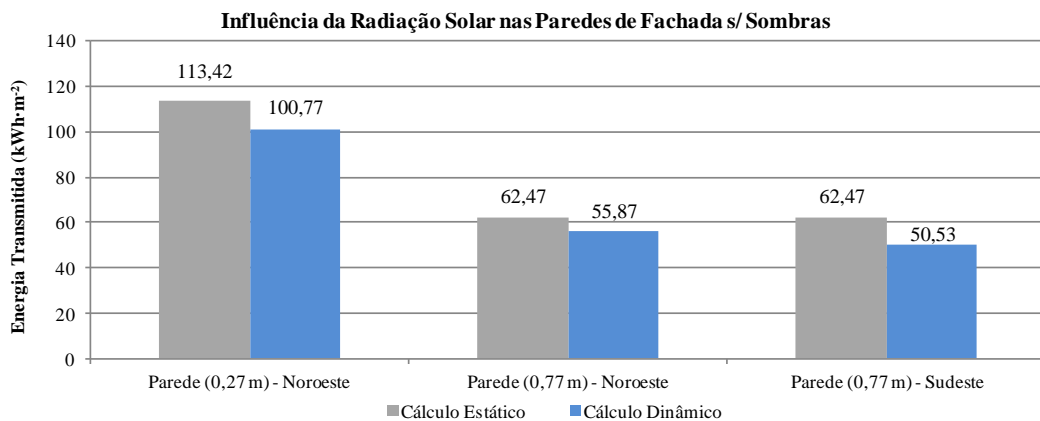


Figura G.9 - Gráfico da influência da radiação solar nas paredes de fachada s/sombra