



**Francisco Marques
Almeida dos Santos
Moreira**

**Otimização do Comportamento Térmico de Edifícios
do Tipo LSF**



**Francisco Marques
Almeida dos Santos
Moreira**

**Otimização do Comportamento Térmico de Edifícios
do Tipo LSF**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

o júri

Presidente

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor Romeu da Silva Vicente
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Orientador

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço ao meu orientador científico Professor Doutor Nelson Martins, pelo apoio, disponibilidade e sugestões fundamentais ao desenvolvimento da minha dissertação.

À instituição da Universidade de Aveiro e em particular ao Departamento de Engenharia Mecânica, a todos os bons profissionais cujos ensinamentos não me irei esquecer.

Aos meus colegas e amigos de Aveiro, pelos bons momentos, frustrações partilhadas e encorajamento mútuo: “Vá lá pá, isso está quase.”

À minha família, avós, pais e irmã pelo amor e educação.

A ti, Sara, por me teres completado, pelo amor, carinho, dedicação e inspiração.

Obrigado

palavras-chave

edifícios sustentáveis, técnicas construtivas alternativas, LSF, casas modulares, eficácia térmica, eficiência energética, inércia térmica, massa térmica, paredes de água, viabilidade económica, solução custo ótimo.

resumo

No panorama energético atual, medidas de desenvolvimento sustentável têm uma preponderância cada vez mais significativa e, sendo os edifícios responsáveis por 40% da energia consumida na EU, enquadra-se o desafio de integrar medidas de eficiência energética nos novos edifícios desde a fase de conceção. Sendo que este setor se encontra em contínua expansão, a redução dos consumos passará largamente pela otimização do comportamento térmico dos edifícios e dos sistemas energéticos que os equipam.

No presente trabalho estudou-se o papel da inércia térmica na redução das necessidades de energia para climatização de edifícios com o objetivo de identificar estratégias destinadas ao melhoramento do comportamento térmico e desempenho energético de edifícios construídos com recurso à técnica construtiva LSF, caracterizados por uma fraca inércia térmica quando comparados com edifícios em tudo semelhantes mas construídos recorrendo a tecnologias convencionais sem esquecer as questões relacionadas com a respetiva viabilidade económica. Com resultado geral destaca-se desde logo a importância do local onde é mais benéfico adicionar massa térmica (paredes exteriores, cobertura, paredes interiores), assim como a necessidade de utilização de um material com elevada densidade energética e baixo custo. A análise comparativa dos diferentes modelos de edifício simulados com recurso ao software DesignBuilder/EnergyPlus, foi realizada recorrendo a uma metodologia em que cada modelo construtivo é avaliado considerando quatro níveis de isolamento térmico e duas condições de cargas térmicas internas.

A análise energética e económica foi realizada tendo como referência um período de 20 anos. O custo das soluções construtivas foi maioritariamente obtido através da ferramenta computacional Gerador de Preços, da Cype, SA©, tendo-se considerado um consumo energético anual constante e igual às necessidades de climatização anuais, assim como taxas de atualização de capital e de inflação do custo da energia constantes.

De uma forma geral conclui-se que edifícios do tipo LSF melhorados através da adição criteriosa de massa térmica em determinados elementos construtivos, apresentam necessidades de climatização anuais na maioria dos casos estudados, inferiores àquelas verificadas em edifícios convencionais com inércia térmica média/forte. Conclui-se, também, que o método construtivo LSF se apresenta mais eficaz em termos energéticos e económicos quando comparado com soluções semelhantes construídas com recurso a um método convencional. Na secção seguinte são identificadas as principais conclusões deste trabalho

keywords

sustainable buildings, alternative building techniques, LSF, modular houses, thermal efficiency, energy efficiency, thermal inertia, thermal mass, water walls, economic viability, optimum cost solution.

abstract

In the current energetic panorama, actions of sustainable development have an increasing importance, where buildings are responsible for 40% of all the consumed energy in the EU, fitting the challenge of increasing the energy efficiency of new buildings since the stage of conception. This sector is in continuous expansion, so, decreasing the energy consumption will undergo by the optimization of the thermal behaviour of buildings and of the energetic system that equips them. known

In the present work the role of thermal inertia in reducing buildings energy needs was studied with the objective of identifying strategies aimed at improving the thermal behaviour and energy performance of LSF buildings, without forgetting the respective economic viability. Nevertheless their recognized advantages, LSF buildings are characterized by a weak thermal inertia when compared to similar conventional buildings, what is a known handicap. The obtained results highlighted the importance of correctly choose the location in the building structure where it is most beneficial to add thermal mass (exterior walls, roof, interior walls), as well as the need to use a material having simultaneously high energy density and low cost. The comparative analysis of different simulated building models using *DesignBuilder/ EnergyPlus* software, was developed considering four levels of thermal insulation and two internal heat loads scenarios.

The energy and economic analysis was performed with reference to a period of 20 years. The cost of construction solutions was mainly using the computational tool *Prices Generator*, from Cype, SA. Constant annual energy consumption and increasing rates of inflation and energy cost were considered. In general it is concluded that LSF buildings improved by a careful addition of thermal mass in specific building elements, have annual climatization needs lower than those observed in equivalent conventional buildings with medium/high thermal inertia. It follows also that constructive LSF method appears more energy and economically efficient when compared to similar solutions constructed using a conventional method.

Conteúdo

Lista de Tabelas	iv
Lista de Figuras	ix
Lista de Símbolos e Acrónimos.....	xi
Capítulo 1	1
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.1.1 Edifícios sustentáveis	3
1.1.2 Industrialização dos modelos construtivos	4
1.1.3 Técnica construtiva LSF	9
1.2 Objetivos gerais	11
1.3 Revisão bibliográfica	12
1.3.1 Otimização do desempenho térmico dos edifícios	12
1.3.2 Ferramentas computacionais	23
1.3.3 Legislação, Regulamentos e Normas.....	25
1.3.4 Síntese	27
1.4 Contributo da dissertação	28
1.5 Organização do documento	29
Capítulo 2	30
2 Comportamento Térmico de Edifícios do Tipo LSF e Convencional.....	30
2.1 Sumário	30
2.2 Caracterização de soluções construtivas comuns.....	30
2.3 Definição de caso de referência	34
2.3.1 Implantação e dados climáticos	34
2.3.2 Caracterização geométrica e dimensional	35
2.3.3 Caracterização das opções construtivas	37
2.3.4 Caracterização das condições operacionais: ocupação, equipamentos e sistemas	41
2.3.5 Indicadores de desempenho térmico e energético	44
2.4 Análise crítica de resultados	46

2.4.1	Edifícios com cargas térmicas internas reduzidas - LSF Vs. Convencional	46
2.4.2	Edifícios com cargas térmicas internas relevantes - LSF Vs. Convencional.....	48
2.5	Síntese do capítulo	50
3	Inércia e Resistência Térmica no Estudo e Otimização do Comportamento Térmico de Edifícios	52
3.1	Sumário	52
3.2	Metodologia de análise.....	52
3.3	Potencial de poupança energética pelo aumento de massa térmica em diferentes elementos construtivos.....	55
3.3.1	Caracterização de caso de referência	55
3.3.1.1	Caracterização das opções construtivas.....	55
3.3.1.2	Indicadores de desempenho térmico e energético.....	60
3.3.2	Análise crítica de resultados.....	60
3.3.2.1	Edifícios com cargas térmicas internas reduzidas.....	60
3.3.2.2	Edifícios com cargas térmicas internas relevantes	73
3.4	Estratégia de otimização do edifício LSF e análise comparativa entre o comportamento térmico de várias soluções.....	83
3.4.1	Caracterização de caso de referência	83
3.4.1.1	Caracterização das opções construtivas.....	86
3.4.1.2	Indicadores de desempenho térmico e energético.....	88
3.4.2	Análise crítica de resultados.....	90
3.4.2.1	Edifícios com cargas térmicas internas reduzidas.....	90
3.3.2.2	Edifícios com cargas térmicas internas relevantes	93
3.4.3	Considerações sobre os PCM's.....	95
3.5	Síntese do capítulo	96
4	Análise Energética e Económica.....	98
4.1	Sumário	98
4.2	Metodologia de análise e principais pressupostos	98
4.2.1	Fatores económicos e energéticos.....	98
4.2.2	Custo de investimento	99
4.2.3	Consumo energético	100
4.2.4	Caracterização das soluções construtivas.....	100
4.2.5	Análise comparativa	102

4.3	Análise energética e económica simplificada do edifício LSF e convencional	104
4.3.1	Edifícios com cargas térmicas internas reduzidas.....	104
4.3.2	Edifícios com cargas térmicas internas relevantes	111
4.4	Análise de sensibilidade	116
4.5	Síntese do capítulo	117
5	Conclusões.....	118
5.1	Sumário	118
5.2	Principais conclusões.....	118
5.3	Sugestões de trabalho futuro.....	119
6	Referências bibliográficas	122
7	Anexos.....	128
7.1	Anexo I – Caracterização das soluções construtivas do edifício LSF e convencional.....	128
7.2	Anexo II – Caracterização das condições operacionais.....	132
7.3	Anexo III – Caracterização das soluções construtivas do edifício de betão armado e LSF melhorado.....	137
7.4	Anexo IV – Soluções construtivas e respetivos indicadores energéticos e económicos	142

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Materiais construtivos do edifício LSF e respectivas propriedades térmicas e físicas relevantes.....	31
Tabela 2 - Materiais construtivos do edifício convencional e respectivas propriedades térmicas e físicas relevantes	32
Tabela 3 - Materiais construtivos do edifício “betão armado” e respectivas propriedades térmicas e físicas relevantes	33
Tabela 4 - Massa útil dos edifícios construídos recorrendo às diferentes técnicas.....	34
Tabela 5 – Solução construtiva das paredes, pavimento e cobertura do edifício LSF para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,8 W/(m^2.K)$	40
Tabela 6 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício convencional para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,8 W/(m^2.K)$	41
Tabela 7 – Fator de atraso e fator de amortecimento do edifício LSF para cada nível de isolamento	45
Tabela 8 – Fator de atraso e fator de amortecimento do edifício convencional para cada nível de isolamento.....	46
Tabela 9 - Necessidades de climatização do edifício LSF sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica.....	46
Tabela 10 - Necessidades de climatização do edifício convencional sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica.....	47
Tabela 11 - Diferença percentual entre as necessidades de climatização do edifício LSF e convencional para cada valor de resistência térmica quando sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas	48
Tabela 12 - Necessidades de climatização do edifício LSF sujeito a cargas térmicas internas relevantes para cada valor de resistência térmica.....	48
Tabela 13 - Necessidades de climatização do edifício convencional sujeito a cargas térmicas internas relevantes para cada valor de resistência térmica	49
Tabela 14 - Diferença percentual entre as necessidades de climatização do edifício LSF e convencional para cada valor de resistência térmica quando sujeitos a cargas térmicas internas relevantes.....	50

Tabela 15 - Solução construtiva das paredes exteriores, cobertura e paredes interiores do edifício simplificado para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	56
Tabela 16 - Solução construtiva das paredes exteriores, cobertura e paredes interiores do edifício simplificado para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	57
Tabela 17 - Solução construtiva das paredes exteriores, cobertura e paredes interiores do edifício simplificado para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	58
Tabela 18 - Solução construtiva das paredes exteriores, cobertura e paredes interiores do edifício simplificado para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	59
Tabela 19 - Massa térmica de todas as soluções construtivas em estudo	59
Tabela 20 – Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	61
Tabela 21 – $P_{pi}'s$ do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	64
Tabela 22 – Diferenças percentuais entre os $P_{pi}'s$ das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	64
Tabela 23 - Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	65
Tabela 24 - $P_{pi}'s$ do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	66
Tabela 25 - Diferenças percentuais entre os $P_{pi}'s$ das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	67
Tabela 26 - Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	67
Tabela 27 - $P_{pi}'s$ do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	69

Tabela 28 - Diferenças percentuais entre os $P_{pi}'s$ das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$	69
Tabela 29 - Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2.K)$	70
Tabela 30 - $P_{pi}'s$ do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2.K)$	71
Tabela 31 - Diferenças percentuais entre os $P_{pi}'s$ das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2.K)$	71
Tabela 32 – Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 W/(m^2.K)$	73
Tabela 33 – $P_{pi}'s$ do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 W/(m^2.K)$	75
Tabela 34 – Diferenças percentuais entre os $P_{pi}'s$ das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 W/(m^2.K)$	75
Tabela 35 - Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 W/(m^2.K)$	76
Tabela 36 - $P_{pi}'s$ do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 W/(m^2.K)$	77
Tabela 37 - Diferenças percentuais entre os $P_{pi}'s$ das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 W/(m^2.K)$	78
Tabela 38 - Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$	78
Tabela 39 - $P_{pi}'s$ do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$	80
Tabela 40 - Diferenças percentuais entre os $P_{pi}'s$ das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$	80
Tabela 41 - Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2.K)$	81

Tabela 42 - $Ppi's$ do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2.K)$	82
Tabela 43 - Diferenças percentuais entre os $Ppi's$ das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2.K)$	82
Tabela 44 - meb de diferentes materiais	84
Tabela 45 - eeb de diferentes materiais	85
Tabela 46 – Massa útil dos diferentes edifícios em estudo	86
Tabela 47 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício de betão para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,8 W/(m^2.K)$	87
Tabela 48 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício LSF melhorado para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,8 W/(m^2.K)$	88
Tabela 49 – Fator de atraso e fator de amortecimento do edifício de betão para cada nível de isolamento.....	89
Tabela 50 – Fator de atraso e fator de amortecimento do edifício LSF melhorado para cada nível de isolamento.....	89
Tabela 51 - Necessidades de climatização do edifício LSF sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica.....	90
Tabela 52 - Necessidades de climatização do edifício convencional sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica.....	91
Tabela 53 - Necessidades de climatização do edifício de betão armado sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica.....	91
Tabela 54 - Necessidades de climatização do edifício LSF melhorado sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica.....	91
Tabela 55 – Diferença percentual entre as necessidades de climatização anuais do edifício LSF melhorado e convencional quando sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas	92
Tabela 56 - Necessidades de climatização do edifício LSF sujeito a cargas térmicas internas relevantes para cada valor de resistência térmica.....	93
Tabela 57 - Necessidades de climatização do edifício convencional sujeito a cargas térmicas internas relevantes para cada valor de resistência térmica	93
Tabela 58 - Necessidades de climatização do edifício de betão armado sujeito a cargas térmicas internas relevantes para cada valor de resistência térmica	93

Tabela 59 - Necessidades de climatização do edifício LSF melhorado sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica.....	93
Tabela 60 - Diferença percentual entre as necessidades de climatização anuais do edifício LSF melhorado e convencional quando sujeitos a cargas térmicas internas relevantes	95
Tabela 61 - Representação simplificada das combinações construtivas definidas para o edifício LSF	101
Tabela 62 - Representação simplificada das combinações construtivas definidas para o edifício convencional	102
Tabela 63 – Massa térmica referente a cada espessura de elemento construtivo no edifício LSF	102
Tabela 64 - Massa térmica referente a cada espessura de elemento construtivo no edifício convencional	102
Tabela 65 – Soluções construtivas LSF sujeitas a cargas térmicas internas reduzidas e respetivos indicadores energéticos e económicos.....	105

Lista de Figuras

Figura 1 – Palácio de Cristal, 1851 (9)	5
Figura 2 – Exemplo da <i>American System-Built Homes</i> , 1916 (9)	6
Figura 3 – <i>Dymaxion house e criança centauro</i> (9)	7
Figura 4 – Sistema construtivo LSF (15)	11
Figura 5 - Representação esquemática da posição do sol no Verão e no Inverno em relação a um vão envidraçado com pala de sombreamento (38)	14
Figura 6 – “Onda de calor” e fatores de inércia térmica (42)	18
Figura 7 - Efeito <i>supercooling</i> (45)	22
Figura 8 - Separador do <i>DesignBuilder</i> com a implantação do modelo.....	35
Figura 9 - Perspetiva sul e oeste do edifício modelado no <i>DesignBuilder</i>	36
Figura 10 - Perspetiva sul e este do edifício modelado no <i>DesignBuilder</i>	36
Figura 11 - Planta do edifício.....	37
Figura 12 - Representação gráfica das necessidades de climatização de ambos os edifícios sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas	47
Figura 13 - Representação gráfica das necessidades de climatização de ambos os edifícios sujeitos a cargas térmicas internas relevantes.....	49
Figura 14 - Combinações dos elementos construtivos com diferentes massas	54
Figura 15 – Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 W/(m^2.K)$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos.....	63
Figura 16 - Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 W/(m^2.K)$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos.....	65
Figura 17 - Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos.....	68
Figura 18 - Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2.K)$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos.....	70

Figura 19 – Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos.....	74
Figura 20 - Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos.....	76
Figura 21 - Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos.....	79
Figura 22 - Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos.....	81
Figura 23 - Representação gráfica das necessidades de climatização dos edifícios sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas	92
Figura 24 - Representação gráfica das necessidades de climatização dos edifícios sujeitos a cargas térmicas internas relevantes.....	94
Figura 25 – Representação gráfica do VAL de cada solução construtiva LSF, sujeita a cargas térmicas internas reduzidas, em função dos consumos energéticos anuais.....	106
Figura 26 - Representação gráfica do VAL de cada solução construtiva convencional, sujeita a cargas térmicas internas reduzidas, em função dos consumos energéticos anuais.....	108
Figura 27 – Disposição gráfica do VAL das soluções LSF face às soluções de “igual categoria” convencionais para os edifícios sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas.....	110
Figura 28 - Representação gráfica do VAL de cada solução construtiva LSF, sujeita a cargas térmicas internas relevantes, em função dos consumos energéticos anuais.....	111
Figura 29 - Representação gráfica do VAL de cada solução construtiva convencional, sujeita a cargas térmicas internas relevantes, em função dos consumos energéticos anuais	113
Figura 30 - Disposição gráfica do benefício das soluções LSF face às soluções de “igual categoria” convencionais para os edifício sujeitos a cargas térmicas internas relevantes.....	115

Lista de Símbolos e Acrónimos

EPBD	<i>Energy Performance Building Directive</i>
nZEB	<i>Nearly Zero-Energy Building</i>
LSF	<i>Light Steel Framing</i>
φ	Fator de atraso [h]
f	Fator de amortecimento
k	Condutividade térmica [$W/m \cdot K$]
c_p	Calor específico [$J/(kg \cdot K)$]
ρ	Densidade [kg/m^3]
e	Espessura [cm]
U	Coefficiente de transmissão térmica [$W/(m^2 \cdot K)$]
M_u	Massa do edifício por área útil de pavimento [kg/m^2]
R''	Resistência térmica por unidade de área [$m^2 \cdot K/W$]
D	Densidade energética [$J/(m^3 \cdot K)$]
q''	Fluxo de calor [W/m^2]
N''_{tot}	Necessidades de climatização anuais (aquecimento e arrefecimento) por área útil de pavimento [kWh/m^2]
N_{aq}	Necessidades de aquecimento [kWh]
N_{arr}	Necessidades de arrefecimento [kWh]
$\%_{tot}$	Diferença percentual das necessidades de climatização entre dois edifícios
eeb	Espessura equivalente de betão [cmeb]
m_{eb}	Massa equivalente de betão [kgeb]
P_{pi}	Potencial de poupança pela inércia [$Wh/kgeb$]
$\%_{Ppi}$	Diferenças percentuais entre os P_{pi} 's das paredes interiores e dos restantes elementos construtivos em estudo
VAL	Valor atual líquido [$€/m^2$]
C_f	Custo final [$€/m^2$]
I_0	Investimento inicial [$€/m^2$]
c_a	Consumo energético anual [kWh/m^2]
i	Ano presente
N	Número de anos a considerar na análise
t	Inflação do preço da energia
d	Taxa de atualização de capital
C_{e0}	Custo da energia no ano 0 [$€/kWh$]
SC	Sobrecusto [$€/m^2$]
PCE	Poupança no consumo energético [$€/m^2$]

Capítulo 1

1 Introdução

1.1 Contextualização

No panorama energético atual, medidas de desenvolvimento sustentável têm uma preponderância cada vez mais significativa e, sendo os edifícios responsáveis por 40% da energia consumida na UE (1), enquadra-se o desafio de integrar medidas de eficiência energética nos novos edifícios desde a fase de conceção. Sendo que este setor se encontra em contínua expansão, a redução dos consumos passará largamente pela otimização do desempenho térmico dos edifícios e dos sistemas energéticos que os equipam.

Esta fatia considerável do consumo energético é especialmente preocupante se alargarmos as fronteiras e considerarmos os países em desenvolvimento na equação, visto que durante as próximas décadas haverão centenas de milhões de pessoas a emergirem do nada em que vivem reclamando um lugar na sociedade desenvolvida. Terá de haver a capacidade de satisfazer as necessidades dessas pessoas, algo que poderá estar comprometido se não se alterarem os paradigmas e mentalidades subjacentes ao ciclo produtivo linear^a (2) que tem sido padrão desde o século XVIII.

Os índices de conforto e hábitos padrão de um típico europeu implicam que seriam necessários no mínimo 2 planetas Terra para explorar se todas as pessoas no Mundo vivessem da mesma forma, tendo em conta como, na atualidade, se gera energia útil (3).

Em qualquer conceito de sustentabilidade, o desafio inicial prende-se com a minimização das necessidades, com o decréscimo do consumo – como criar um bem ou serviço com uma qualidade igual ou superior ao anterior, gastando menos recursos. Visto num panorama mais geral: como viver confortavelmente, consumindo menos.

A diretiva EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*) Reformulada (2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010) fortalece e atualiza os requisitos térmicos da envolvente opaca e dos vãos envidraçados, e cria exigências a nível da eficiência energética dos principais sistemas, indo ao encontro das metas e desafios acordados entre os Estados-Membro para 2020 (redução em 20% das emissões de gases com efeito de estufa em relação aos indicadores de 1990, redução de 20% do consumo energético e estipulação de 20% do total da energia consumida como sendo de origens renováveis) (1). Assim, os requisitos e a avaliação do desempenho térmico de um edifício passam a assentar fundamentalmente no comportamento térmico e eficiência dos sistemas energéticos e são definidos requisitos específicos a cumprir em edifícios novos, edifícios existentes e edifícios sujeitos a intervenção.

^a Ciclo que não é cíclico, não havendo nenhuma realimentação (de matéria prima ou energia) ao longo do processo produtivo.

Surge também o conceito nZEB (*nearly zero-energy building*) que consiste num edifício com um muito elevado desempenho energético, sendo que as (reduzidas) necessidades energéticas deverão ser maioritariamente suprimidas por fontes renováveis, incluindo energia renovável produzida localmente. Estes edifícios passarão a constituir um paradigma a partir de 2020 (2018 para edifícios públicos), a acrescentar ao requisito, que já é atualmente imposto, de construir todos os novos edifícios numa base de custo ótimo^b, efetuadas exceções para o caso de edifícios que se aproximem das necessidades quase nulas antes de 2020 (1).

A necessidade de racionalizar consumos, incluir o conceito de eco-eficiência a métodos e processos, melhorar o rendimento de sistemas e aproximar o ciclo produtivo de um ciclo fechado com vista a um desenvolvimento sustentável enquadram-se plenamente naquilo que são as metas e desafios traçados pelas normas europeias.

A grande parcela do consumo energético associado aos edifícios tem uma especial importância porque, para além de ser um valor muito acentuado, existe um enorme potencial para o atenuar, uma vez que os edifícios construídos em Portugal nas últimas décadas e, em larga parte, atualmente estão longe de estar otimizados em termos energéticos, pecando em especial no desempenho térmico.

Surge, então, a necessidade de desenvolver técnicas, materiais e sistemas construtivos que aliem a competitividade económica à eficiência energética, eficiência que não está somente relacionada com a fase de utilização do edifício, mas também com a fase de construção (ou (pré) fabricação) e fase fim de vida. Estes dois últimos aspetos não são conseguidos com estratégias de climatização de melhor rendimento e eficácia, estão antes intrinsecamente ligados ao processo construtivo adotado.

É neste contexto que o método construtivo LSF (*Light Steel Framing*) se apresenta como uma alternativa com grande potencial em relação à típica construção em betão armado e alvenaria. A energia embebida^c associada a este processo construtivo é muito inferior àquela inerente ao processo convencional, o que se traduz numa poupança de recursos naturais, havendo também uma elevada capacidade de reciclagem e reutilização dos materiais construtivos depois do desmantelamento do edifício (4).

Com o estudo detalhado de técnicas e tecnologias que otimizem o comportamento térmico dos edifícios LSF, nomeadamente no aspeto da inércia térmica, será possível minimizar as necessidades energéticas, consolidando a tendência estritamente necessária de conservar energia e recursos.

^b Solução construtiva que resulta no menor custo de ciclo de vida, sendo contabilizados os gastos em consumos energéticos num período de 20 ou 40 anos e o custo de investimentos e manutenção do edifício ao longo do mesmo período.

^c Energia consumida para que um bem ou serviço exista e/ou opere num determinado local. Contabiliza-se a energia empregue na extração de matérias-primas, manufatura, transporte, manuseamento, manutenção desse bem ou serviço.

1.1.1 Edifícios sustentáveis

Desenvolvimento sustentável foi definido, em 1987, no *Brundtland Report* como o desenvolvimento que cumpre as necessidades do presente sem comprometer a satisfação das mesmas por parte das gerações futuras (Apud 5). Esta premissa surge na atualidade quase como um mandamento para que décadas adiante a população mundial possa viver e não sobreviver dos restos que lhes deixámos. São enumeradas três vertentes que se complementam e traduzem o plano geral da sustentabilidade: ambiental, económica e social.

O desenvolvimento sustentável está na ordem do dia e muitos dos avanços tecnológicos patentes hoje em dia têm uma aplicação orientada para alterar os padrões de consumo energético, mitigar os efeitos e minimizar a exploração de recursos naturais e geração de desperdícios através de medidas de ecoeficiência.

O setor dos edifícios é responsável por cerca de 40% da energia consumida mundialmente e, sendo que mais de 80% dessa energia provém de fontes não renováveis (1), é evidente que a otimização do desempenho energético dos edifícios tem um papel muito importante no contributo para a minimização do impacto ambiental global.

A fase do ciclo de vida dos edifícios a que é dada maior importância é a de utilização. É durante o período de ocupação que o edifício consome a maior parcela de energia e recursos, causando um maior impacto no meio ambiente, em suma porque essa energia é maioritariamente proveniente de fontes não renováveis cuja produção gera gases e resíduos poluentes. No entanto, as fases de projeto, produção de materiais, construção e fim de vida não devem ser negligenciadas para que seja possível um correto apuramento do impacto ambiental global do edifício.

Desde a fase de projeto, passando pelo fabrico dos elementos construtivos, construção, utilização/ocupação, até ao fim de vida e resultante desmantelamento do edifício, é essencial que predominem os conceitos e noções de eficiência energética e ecoeficiência, conservação de energia, reciclabilidade, potencial de reutilização, uso racional de água e outros recursos, minimização da exploração de recursos e geração de resíduos/poluição (vertente ambiental), boas condições (conforto, saúde, trabalho) para quem intervém em qualquer fase do ciclo de vida do edifício (vertente social), custos controlados dos processos e tecnologias a aplicar no edifício (vertente económica) (6) (7). Estes objetivos apenas são conseguidos com a estreita parceria entre as diversas entidades intervenientes no edifício: arquitetos, engenheiros, operários, etc.; projeta-se o edifício para que este tenha, tanta quanto possível, uma relação simbiótica com o meio ambiente e os ocupantes.

Os materiais e soluções construtivas do edifício, assim como sistemas de climatização e de supressão de necessidades básicas, deverão ser o menos intrusivo possível para o meio, contendo uma baixa energia embebida, e tendo em consideração as condições climáticas locais – construção bioclimática -, sendo que, por exemplo, uma solução construtiva eficaz num clima quente e húmido não apresentará o mesmo desempenho num clima frio e seco.

Um edifício sustentável é aquele que, ao longo do seu ciclo de vida, causa impactos no meio ambiente que não são significativos ou que são facilmente “absorvidos” na regeneração natural do planeta. Tem de ser igualmente viável em termos económicos e sociais, sendo as soluções construtivas passíveis de aplicar a custos moderados e, ainda que mais difícil de avaliar, deverá haver um impacto positivo na comunidade (e.g. possibilidade de criação de postos de trabalho no desenvolvimento e produção de novas técnicas construtivas).

Um destaque para a vertente económica, uma vez que é aquela que dita se as ideias, os avanços tecnológicos, são aplicáveis à larga escala da construção civil ou se não passam de protótipos com um interesse exclusivamente técnico. Através de uma análise CCV (Custo Ciclo de Vida) determina-se o custo total associado ao edifício, tendo em consideração o investimento inicial da solução construtiva, custos de operação e manutenção (que variam anualmente devido à subida do preço da energia, à inflação global da moeda e à taxa de atualização de capital) e fim de vida (8). Esta ferramenta permite encontrar o custo ótimo de um edifício, relacionando o investimento aplicado às estratégias de otimização energética com os consumos que lhes estão associados.

1.1.2 Industrialização dos modelos construtivos

A revolução industrial do século XVII trouxe uma panóplia de novas técnicas, processos e máquinas que permitiram a produção de edifícios em larga escala, dando origem a movimentos e escolas que se dedicaram ao aprofundamento das técnicas e sistemas mais eficazes que culminassem em melhores modelos de casas pré-fabricadas. Muito além de um mero desafio técnico, engenheiros, arquitetos e industriais trabalharam em uníssono para criar edifícios rápidos de construir e de custos controlados, mantendo a liberdade artística do projeto, a qualidade construtiva e a essência de um lar.

Com a produção mecanizada e estandardizada dos elementos construtivos *ex situ*, o objetivo era mover a técnica para montante (da sequência produtiva do edifício), tornando a edificação mais rápida, fácil e acessível, evitando a mão-de-obra local onde o rigor é menos do que pouco. Numa instalação fabril, existem apertados requisitos de qualidade e eficiência (produtiva e, mais recentemente, energética).

Desde a última metade do século XIX, vários foram os modelos que, mesmo sem singrarem como previsto, provaram ser viáveis do ponto de vista económico e social, principalmente nos períodos do pós-guerra em que existia uma necessidade imensa em reconstruir rapidamente cidades inteiras.

Agren e Wing (9) enumeram cinco momentos chave na história dos edifícios industrializados:

- Pré-fabricação inicial

Durante os primeiros anos da revolução industrial, os avanços na produção mecanizada e métodos de transporte, levaram a que se produzisse, a custos controlados, ferro fundido e componentes em madeira para a construção de edifícios.

Toda a estrutura do edifício era fabricada fora da obra. Depois era transportada por comboio ou navio até o local da construção, onde era erguida, montando-se os elementos pré-fabricados.

O Palácio de Cristal, de Joseph Paxton, cuja estrutura e envolvente foi totalmente construída em ferro fundido, vidro e madeira, é um edifício marcante desta época, onde os novos processos e uso de novos materiais mostraram a potencialidade daquilo que poderia ser feito no futuro. No entanto, as técnicas que eram empregues em grandes e complexos edifícios não se mostraram adequadas para a construção de casas residenciais.



Figura 1 – Palácio de Cristal, 1851 (9)

- Envolvimento de arquitetos de referência

O objetivo era criar edifícios elegantes, leves, rápidos de construir e com o mínimo de desperdício; preocupações que são de uma semelhança admirável em relação àquilo que é o cenário atual, um século depois.

Frank Lloyd Wright desenvolveu o projeto *American System-Built Homes* cujo objetivo se prendia com a criação de habitações acessíveis, sem comprometer a integridade estrutural, estética e comodidade da casa. Wright comentou, em 1938, na revista *Architectural Forum*: “Prefiro resolver o problema das pequenas casas do que construir qualquer outra coisa que me ocorra...” (Apud 9).

Estes edifícios tinham uma estrutura de madeira estandardizada fabricada *ex situ* e os detalhes de ligação entre os elementos eram feitos com recurso a maquinaria de elevada precisão. Esta metodologia conferia uma qualidade superior e estabilidade estrutural, enquanto se minimizavam os desperdícios de material, mão-de-obra local e custo final.



Figura 2 – Exemplo da *American System-Built Homes*, 1916 (9)

Le Corbusier descrevia como objetivo da produção em massa de casas, criar o conceito *house machine* (9,10), defendendo que a casa deve ser uma máquina para se viver, construída com os mesmos princípios e requisitos que qualquer produto industrializado saído de uma linha de produção.

- Edifícios sub-asmblados

Na década de 20, a tecnologia permitia a produção eficiente de elementos e pequenos subconjuntos a integrar no edifício. No entanto, impunha-se a dificuldade em definir módulos completos e mais complexos, pelo que a ênfase foi dada à seleção dos componentes usados, racionalização dos materiais e padronização dos métodos construtivos. Esta ideologia foi evidente na escola *Bauhaus* onde se desenvolveram projetos, como a *Törten Estate*, com o objetivo de reerguer rapidamente edifícios após a Primeira Guerra Mundial, respondendo às necessidades da população afetada.

- Modularização

Buckminster Fuller e Konrad Wachsmann abriram o caminho para os métodos modernos de pré-fabricação e modularização. A casa *Dymaxion* foi um modelo pioneiro construído integralmente *ex situ* (11).



Figura 3 – *Dymaxion house* e criança centauro (9)

A intenção de Fuller era “produzir casas como *Fords*” (Apud 9) que saíssem da linha de produção praticamente prontas a habitar.

A Segunda Guerra Mundial levou a grandes necessidades de realojamento populacional, mais uma vez sendo de grande importância o desenvolvimento e aprofundamento de sistemas e processos que permitissem uma construção veloz e acessível às massas.

Konrad Wachsmann e Walter Gropius criaram o *General Panel System*, um sistema que permitia montar toda a estrutura do edifício rapidamente e com ferramentas rudimentares; toda a técnica já tinha sido empregue no fabrico dos painéis e respetivas junções mecânicas. A previsão de construir milhares de edifícios com este método não foi cumprida, tendo havido problemas na funcionalidade do sistema. Este foi otimizado nos anos 80 por construtoras japonesas que aliaram os conceitos de Wachsmann e Gropius à robótica e automação, tornando o modelo viável.

- Sistemas abertos

O conceito de sistema aberto aplicado aos edifícios destacou-se como uma nova realidade no mundo dos edifícios (12). N. John Habraken foi o grande propulsor das ideias complexas que abrangiam a relação do edifício com o meio envolvente e os ocupantes da habitação, numa interação profunda e simbiótica.

Habraken levou o conceito da modularização mais além e sugeriu uma modularização completa do edifício, concentrando esforços no desenvolvimento de sistemas que permitissem fabricar, transportar e montar todos os elementos da casa, incluindo partições interiores, pavimentos, divisões prontas a receber utensílios e componentes típicos. O avanço da técnica em direção à mecanização e automação dos processos era fundamental para implementar as ideias de forma eficaz, sem limitar a variedade de configurações possíveis de executar num edifício.

Em perspetiva, todos métodos de industrialização de edifícios contribuíram para o desenvolvimento desta indústria e muitos provaram o seu valor em termos económicos, sociais e ambientais, numa época em que o termo “sustentabilidade” não tinha o sentido que tem hoje em dia.

A maioria dos modelos construtivos encontraram limitações de cariz técnico, que hoje em dia seriam facilmente eliminadas dadas as tecnologias disponíveis; mas de maior relevância será a questão social, de aceitação de novas técnicas construtivas que rompiam com as convenções - a inércia à mudança. Estas problemáticas comprometeram a difusão destes modelos, e se olharmos numa perspetiva local, totalmente ignorados ao longo dos anos pelo setor construtivo em Portugal.

1.1.3 Técnica construtiva LSF

A técnica construtiva que esteve na génese do método LSF era denominada por *Balloon Framing* e foi originada no século XIX em território americano. A estrutura do edifício era composta por peças em madeira de secção transversal reduzida (13,14). Na construção dessas habitações foram empregues conceitos da revolução industrial como a praticidade, produtividade e velocidade de execução que tornavam esses edifícios eficazes do ponto de vista construtivo, capazes de dar resposta ao rápido crescimento da população norte americana.

Com o crescimento da indústria metalúrgica nos EUA, em particular no desenvolvimento da tecnologia de aço galvanizado e dos processos de conformação a frio durante o século XX, a estrutura de madeira foi sendo substituída por perfis metálicos (14,15), o que se traduziu numa notável capacidade de industrialização do sistema LSF, com elevados padrões de rigor dimensional e estrutural e cadência produtiva.

O sistema construtivo LSF atual consiste numa estrutura autoportante formada por perfis de aço galvanizado enformados a frio, espaçados regularmente em 600 mm. Os perfis podem ter variadas secções transversais, espessuras e qualidades de aço.

Em termos estruturais, a elevada resistência transversal e longitudinal, juntamente com a flexibilidade geral do conjunto, tornam este método muito eficaz em condições sísmicas (16).

A criação de fissuras e condensações no interior dos elementos construtivos está muito relacionada com a natureza distinta e pesada dos materiais que constituem a envolvente do edifício. A heterogeneidade e descontinuidade de materiais, patente nos edifícios convencionais, são responsáveis pela criação de pontes térmicas, que no limite resultam em condensações, propiciando o aparecimento de fungos, situações minimizadas no método LSF, sendo mais fácil evitar as interrupções de isolamento e onde a reduzida espessura dos perfis metálicos é apenas responsável por pequenas pontes térmicas.

As paredes pesadas compostas por materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica levam a fissurações prematuras, algo que não é problema na estrutura LSF devido à sua leveza, à forma como as cargas estão distribuídas e ao facto das cargas térmicas afetarem de igual forma cada secção da envolvente (pequenas pontes térmicas).

Tomemos como exemplo o fenómeno da dilatação térmica, que é dos principais causadores de fissuras em edifícios, e consideremos o betão e tijolo cerâmico: são materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica (17) o que significa que vão contrair e expandir a ritmos diferentes quando sujeitos à mesma carga térmica, situação que só é minimizada com uma camada de isolamento térmico na superfície exterior da envolvente. Não havendo graus de liberdade para o elemento expandir dimensionalmente e tratando-se materiais de elevada rigidez, após um reduzido número de ciclos o material heterogéneo atinge a fadiga e fissura. O mesmo não se verifica numa estrutura construída inteiramente com o mesmo material e largamente espaçada, mesmo sendo a estrutura travada (normalmente) com painéis OSB (*Oriented strand board*) por intermédio de

ligações mecânicas, estes possuem uma rigidez mais baixa que os materiais cerâmicos e de betão, o que resulta num “acompanhamento” das pequenas deformações a que o conjunto estará sujeito.

Crasto enumerou as seguintes vantagens quanto a este método construtivo (Apud 15):

- Os elementos construtivos são produzidos em fábricas com um rigoroso controlo de qualidade e tecnologia que obedece a requisitos de eficiência energética, ao contrário da construção *in situ*, resultando em produtos com rigor dimensional e estrutural.
- O fabrico de aço enformado a frio não implica processos que consumam grandes quantidades de energia.
- Os perfis, espaçados em 600 mm, fixos por ligações mecânicas a outros elementos metálicos e a painéis OSB, resultam numa estrutura autoportante e flexível, sendo a carga distribuída uniformemente pelos vários perfis e não havendo necessidade de vigas e colunas para garantir a estabilidade estrutural.
- Facilidade de transporte (leveza e geometrias constantes dos elementos construtivos) e montagem rápida dos elementos na obra.
- O processo de galvanização a que os perfis de aço estão sujeitos aumenta a durabilidade da estrutura metálica, impedindo a corrosão e, em situações normais, evitando qualquer intervenção estrutural no edifício ao longo de toda a sua vida útil.
- Liberdade arquitetónica.
- A construção a seco, que não recorre ao uso de água, e as dimensões dos elementos construtivos já acertadas de fábrica, minimiza o uso de recursos naturais e geração de desperdícios – pilares fundamentais no desenvolvimento sustentável.

O método construtivo LSF apresenta algumas desvantagens que constituem desafios acrescidos face a métodos construtivos convencionais, como:

- Estanquidade ao ar, sendo as infiltrações difíceis de controlar.
- Suscetibilidade à durabilidade devido à condensação de vapor de água nos perfis metálicos, sendo necessário uma aplicação metódica de barreiras para-vapor.

No entanto, como principal desvantagem deste método construtivo, insere-se a fraca inércia térmica resultante da leveza dos diversos elementos construtivos. Este problema pode originar situações de sobreaquecimento em climas quentes, dado que a envolvente tem pouca capacidade de absorver a carga térmica, obrigando ao uso de equipamentos mecânicos para eliminar essa carga.

Um dos desafios para tornar o processo LSF o mais competitivo possível está relacionado com a avaliação do benefício da inércia em situações distintas de cargas

térmicas internas em climas temperados e quentes, determinando a importância desta característica em condições reais.

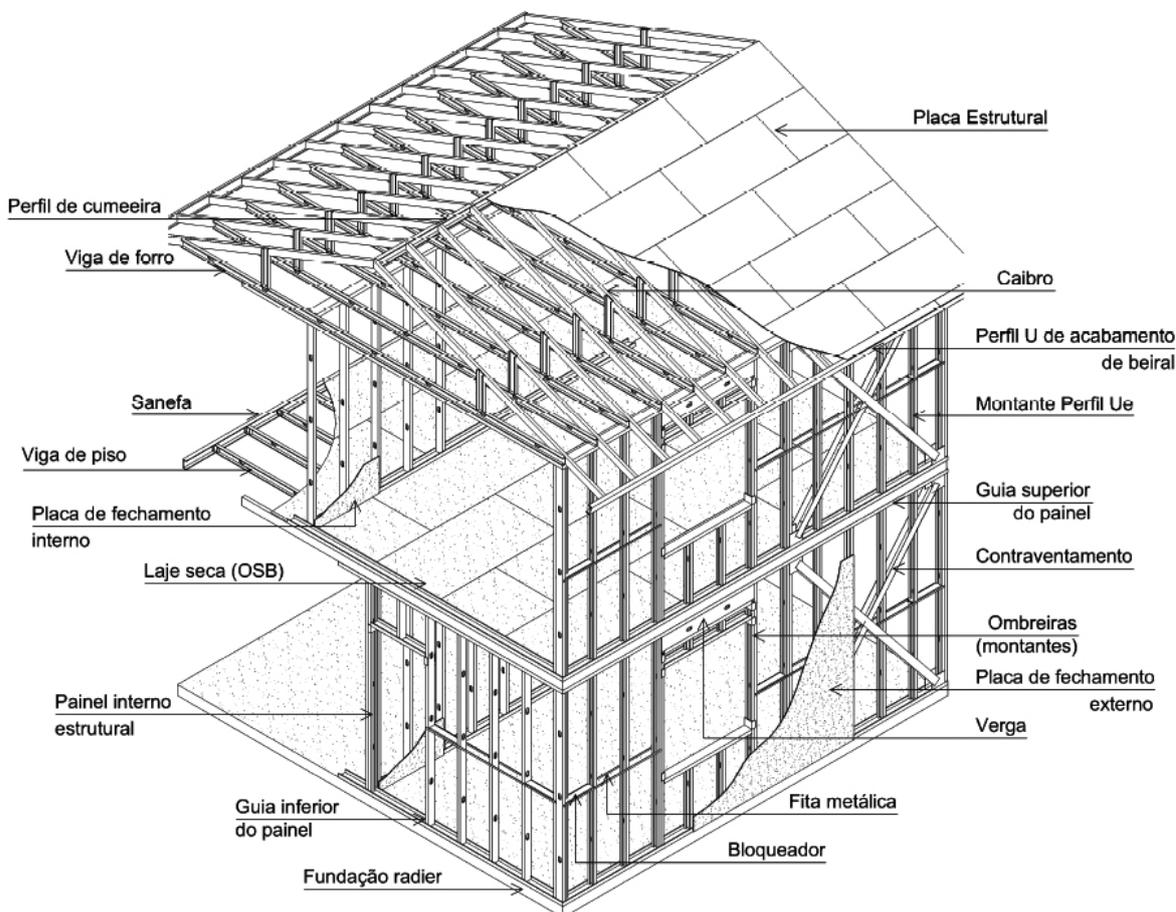


Figura 4 – Sistema construtivo LSF (15)

1.2 Objetivos gerais

A presente dissertação tem como objetivo estudar e otimizar o comportamento térmico de edifícios construídos com recurso à tecnologia LSF.

Será destacado o efeito da inércia térmica na manutenção e controlo da temperatura interior de conforto e o risco de sobreaquecimento, analisando as necessidades de climatização anuais dos edifícios em estudo sob condições de reduzidas e relevantes cargas térmicas internas. Desta forma realçam-se as implicações energéticas da fraca inércia subjacente ao método construtivo LSF quanto ao comportamento térmico de edifícios sujeitos a diferentes condições operacionais.

Avaliar-se-á o comportamento térmico das diferentes soluções - que irão variar em termos de resistência térmica da envolvente exterior e inércia térmica - de método

construtivo LSF e convencional, através de modelos virtuais, recorrendo a ferramentas computacionais de simulação dinâmica (*EnergyPlus/DesignBuilder*).

O contributo do aproveitamento e dissipação de ganhos térmicos no desempenho energético do edifício será determinado estudando a aplicação de massa térmica nos vários elementos construtivos, concluindo, através de indicadores de desempenho térmico e energético, quais os modelos mais eficientes.

Será realizada uma análise energética e económica simplificada do edifício LSF e convencional, onde as diversas soluções serão comparadas em termos de custo de investimento e consumo energético acumulado, no sentido de encontrar soluções construtivas de custo ótimo com o mínimo de necessidades de climatização.

1.3 Revisão bibliográfica

1.3.1 Otimização do desempenho térmico dos edifícios

Sistemas de climatização passivos e quase passivos

Existe uma enorme variedade de sistemas de climatização passivos e quase passivos (que consomem uma pequena quantidade de energia) capazes de satisfazer as necessidades de climatização e conseqüente conforto térmico em qualquer edifício.

Em alternativa aos equipamentos AVAC típicos, podem ser enumeradas estratégias de climatização para arrefecimento e/ou aquecimento como:

- *Free cooling* (18–20) que aproveita o frio que é acumulado num TES (*thermal energy storage*) durante a noite para durante o dia arrefecerem passivamente o espaço climatizado, necessitando exclusivamente de um ventilador que insufla ou extrai o ar (frio e quente, respetivamente). A corrente de ar fria noturna arrefece o material TES, eliminando toda a carga térmica acumulada durante o dia sendo depois esse ar extraído do edifício, e em período diurno outra corrente de ar flui através do sistema, perde calor e é insuflado para dentro do edifício. Uma alternativa mais simples de usar *free cooling* consiste em insuflar ar exterior mais frio do que o ar interior para eliminar a carga térmica diretamente, havendo um permutador de calor no sistema, nas horas em que é favorável usar ar diretamente do exterior (normalmente em períodos noturnos durante a estação de arrefecimento) é feito um *bypass* ao permutador para que não seja trocado calor entre o ar novo e o ar viciado.
- Piso radiante (21) que através de um circuito de água, quente ou fria, sob o pavimento, permite fornecer ou eliminar as cargas térmicas que são necessárias para atingir os índices de conforto térmico. O mesmo princípio pode ser aplicado a

elementos construtivos verticais e lajes (22), aumentando a capacidade térmica das paredes e cobertura através de um fluido circulante, cujo caudal é o mínimo que permite descarregar a carga térmica acumulada. Assim, existe um controlo da capacidade de armazenamento de calor dos elementos construtivos, uma vez que essa capacidade é renovada com auxílio a um compressor.

- Chaminé solar acoplada com permutador de calor geotermal (23) que permite a insuflação de ar, que atravessa uma sequência de tubos subterrâneos, perdendo calor para o solo, para dentro do edifício. O fluxo de ar é forçado (passivamente) pela diferença de pressão resultante do aquecimento da coluna de ar da chaminé solar; esse ar quente sobe até a cota mais alta da chaminé enquanto é puxado ar novo proveniente do exterior arrefecido pelo permutador de calor geotermal, arrefecendo e renovando o ar interior.
- Paredes de Trombe (24–32) que permitem aproveitar os ganhos solares para reduzir as necessidades de aquecimento durante o Inverno. A radiação solar atravessa um elemento envidraçado e a componente TES armazena o calor; esse calor aquece o ar que se encontra entre o envidraçado e o elemento de armazenamento térmico e este é insuflado para dentro do edifício, de forma forçada com o recurso a um ventilador, ou de forma passiva devido à mais baixa densidade do ar quente, que entrará no espaço interior através de uma grelha de admissão a uma cota perto do teto. Para não comportar um desempenho negativo no Verão, a grelha de admissão deverá estar fechada e deverá haver um sistema de ventilação que extraia o ar quente junto à parede para o exterior, reduzindo a carga térmica que entraria por condução. Outra estratégia para diminuir os ganhos solares na estação de arrefecimento é a existência de uma pala de sombreamento dimensionada de modo a permitir a incidência do sol na parede durante Inverno (sendo a trajetória do sol mais baixa, perto do horizonte) e sombrear a parede durante o Verão.
- Coberturas e paredes ajardinadas (33–37) que são particularmente eficazes na diminuição das necessidades de arrefecimento devido a um conjunto de fenómenos térmicos como o aumento da resistência térmica da envolvente, sombreamento e evapotranspiração da vegetação (35). São também uma alternativa ambientalmente sustentável quando comparados com coberturas convencionais, mostrando eficácia no aproveitamento de águas pluviais, propriedades acústicas, intensificação da biodiversidade, mitigação dos efeitos da ilha de calor urbana^d e poluição atmosférica; isto a somar aos benefícios energéticos de climatização (35,37).

Muitas vezes, o problema associado à implementação destes sistemas prende-se com o investimento de aquisição, sendo os custos de operação marginais quando comparados com um sistema AVAC típico.

Assim, a redução das necessidades anuais de climatização e consequente retorno financeiro (*payback*) é uma ferramenta importante na avaliação da aplicabilidade dos

^d Área urbana onde a temperatura média do ar é notoriamente mais elevada do que nas imediações rurais.

diversos sistemas passivos, algo que se demonstra em falta em praticamente todos os estudos efetuados acerca do desempenho térmico de sistemas ou soluções construtivas.

Dentro dos sistemas passivos pode-se incluir a inércia térmica, uma vez que reduz as necessidades de climatização sem recorrer ao consumo de energia. Tem a particularidade de funcionar de acordo com as condições climáticas e intensidade de cargas internas, não sendo controlável para operar num determinado regime ou período pré-definido, caso se trate de um sistemas totalmente passivo.

Sombreamento

Estratégias de sombreamento são outra forma de evitar que a radiação solar se transforme em ganhos indesejados durante a estação de arrefecimento.

As palas de sombreamento devem ser dimensionadas de modo a que a radiação solar não incida diretamente nos vãos envidraçados, sem que tal comprometa a qualidade da luz visível dentro do edifício; bloquear os ganhos solares deteriorando a luminosidade do espaço não é um compromisso viável. Na estação de aquecimento a posição relativa do sol é mais baixa, pelo que, idealmente, o sombreamento obtido pelas palas não deveria interferir com a incidência da radiação diretamente dentro do edifício, levando ao aproveitamento dos ganhos solares, úteis na redução das necessidades de aquecimento.

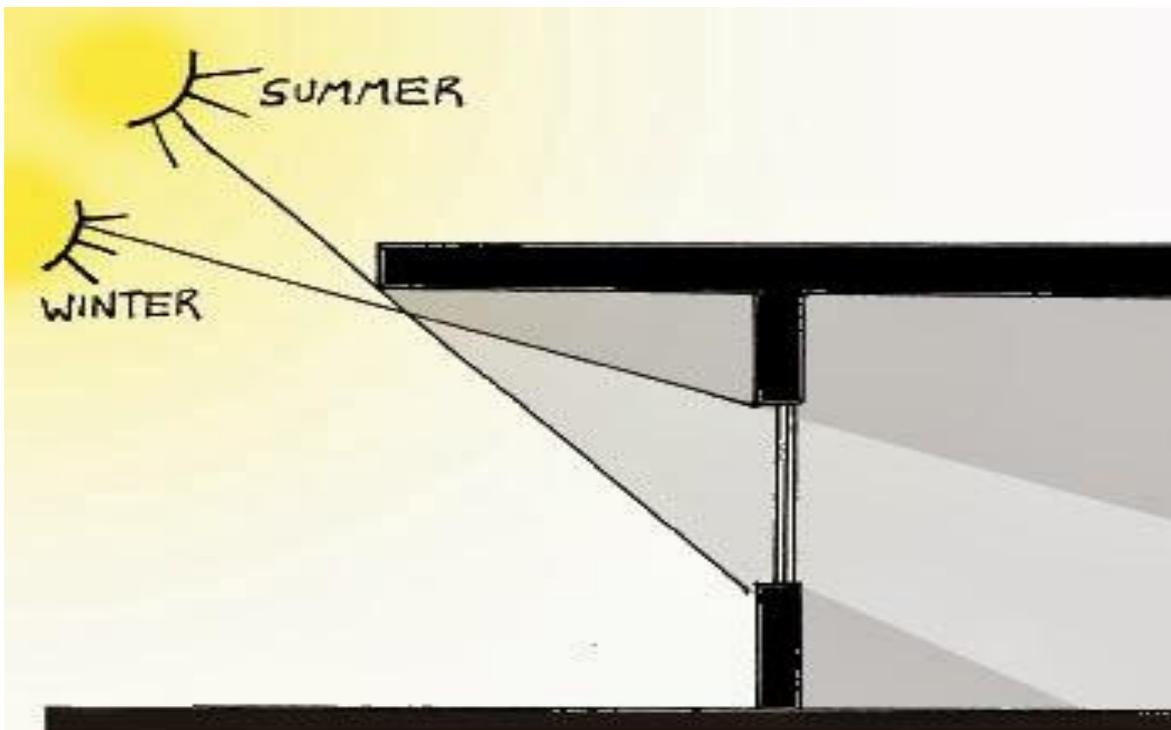


Figura 5 - Representação esquemática da posição do sol no Verão e no Inverno em relação a um vão envidraçado com pala de sombreamento (38)

O uso inteligente de estratégias de sombreamento é particularmente importante em edifícios leves, com fraca inércia térmica, dada a baixa capacidade que os elementos construtivos têm em absorver o calor, havendo o risco de sobreaquecimento se a radiação solar incidir diretamente em elementos interiores, incapazes de armazenar eficazmente essa carga térmica.

David et al. (39) evidenciou a importância do compromisso entre a eficácia térmica e visual de estratégias de sombreamento. Foram comparados índices de conforto visual, autonomia de luz diurna (período diário em que a luz solar é suficiente para iluminar convenientemente um determinado espaço de trabalho) coeficientes de sombreamento (razão entre a intensidade luminosa que atravessa a janela com e sem pala de sombreamento) e necessidades de arrefecimento em quatro tipos de palas diferentes com dimensões variáveis. Quanto menor é o coeficiente de sombreamento, menor são as necessidades de arrefecimento, os índices de conforto visual e autonomia de luz diurna, aumentando os consumos em iluminação artificial. Há, portanto, duas vertentes para determinar a qualidade de um sombreamento, sendo necessário encontrar o equilíbrio entre eficácia visual e térmica para se dimensionar corretamente as palas que devem deixar entrar pelos envidraçados a quantidade certa de luz solar.

Tzempelikos e Shen (40) realizaram um estudo comparativo entre quatro sistemas de sombreamento interior automatizados para avaliar o potencial de poupança de energia de climatização através do decréscimo das cargas térmicas, assim como a qualidade de luz solar interior. As condições para controlar o fecho das persianas são função da irradiação ou da intensidade luminosa, mostrando-se a última mais eficaz na redução das necessidades de arrefecimento.

Berry et al. (41) destacou o potencial das árvores como elementos de sombreamento capazes de reduzir os ganhos solares em edifícios circundantes e de mitigar os efeitos da ilha de calor urbana através da evapotranspiração, contribuindo também para o melhoramento da qualidade do ar. O estudo incidiu: na previsão da temperatura da superfície exterior da envolvente em função da irradiação incidente na fachada vertical, coeficiente de sombreamento e dimensão da sombra produzida pela árvore; em definir a variação diurna e sazonal do coeficiente de sombreamento; e no impacto que a altura e distância da árvore ao edifício têm no aproveitamento do microclima gerado e na temperatura da superfície exterior da envolvente. O modelo preditivo da temperatura superficial da parede obteve resultados particularmente precisos quando em função da dimensão do sombreamento e da irradiação incidente. Demonstra-se a importância do estudo dinâmico do coeficiente de sombreamento em elementos vegetativos, que varia com a densidade da folhagem ao longo do ano. Os resultados realçaram a importância da posição da árvore relativamente ao edifício e da forma da copa para a conservação de energia de climatização.

Inércia térmica

A inércia térmica caracteriza-se como a capacidade que um elemento tem em armazenar calor. A carga térmica acumula-se de forma sensível ou latente, fazendo, respetivamente, com que a temperatura aumente ou ocorra uma mudança de estado físico do material absorvedor.

Densidade [$kg.m^{-3}$], calor específico [$J.kg^{-1}.K^{-1}$], calor latente [$J.kg^{-1}$] e condutividade térmica [$W.m^{-1}.K^{-1}$] são propriedades termofísicas simples que definem a inércia térmica de um material.

Pode-se fazer uma analogia que distingue, visualmente, os conceitos de inércia térmica e isolamento térmico. Para o primeiro, imagine-se uma rede de teias grosseiras dispostas em camadas: cada camada consegue capturar uma quantidade de “material” (calor), deixando que o resto progrida no seio da teia para ser progressivamente armazenado. No segundo, as teias são mais refinadas e as camadas mais unidas: quando o “material” atravessa a rede, uma parte fica imediatamente retida e mais importante, forma um bloqueio à passagem do restante.

No Inverno, a principal preocupação é a de evitar que o calor se perca pela envolvente, e para tal materiais isolantes que minimizem a transferência de calor por condução para o exterior são fundamentais. No entanto, a capacidade calorífica dos materiais que constituem os elementos interiores do edifício é importante na manutenção das condições de conforto e conservação de energia de climatização, uma vez que o calor absorvido por esses elementos será libertado, maioritariamente (tanto mais quanto melhor isolada for a envolvente exterior), de volta para o espaço climatizado.

No Verão, o isolamento também tem um papel fundamental no barramento da condução térmica que flui das camadas exteriores dos elementos construtivos para as camadas interiores, mas as superfícies em contacto com o espaço climatizado não devem ser isolantes. Esta situação pode criar sérios problemas de sobreaquecimento, uma vez que o calor que eventualmente entrou para o interior fica “aprisionado”, não havendo elementos interiores capazes de o absorver – um gradiente térmico em materiais isolantes, provocado pela elevada temperatura ambiente, não resulta numa transferência de calor eficaz devido à baixa condutividade térmica destes materiais. É, então, fundamental que existam elementos interiores com uma elevada capacidade de armazenar calor, com uma forte inércia térmica.

A inércia térmica nos edifícios é uma característica muito relevante em climas temperados e quentes, ainda de maior valor se as amplitudes diárias de temperatura forem consideráveis, e o seu correto aproveitamento vai ao encontro dos requisitos de um edifício bioclimático, tendo os edifícios com forte inércia térmica o melhor comportamento térmico em climas quentes (42,43).

A inércia térmica desloca o pico de carga térmica, resultante da absorção da radiação solar e ganhos convectivos, para horas adiante, diminuindo o fluxo de calor que a partir da

envolvente entra no espaço interior. A partir do momento em que a radiação solar deixa de incidir nos elementos do edifício e a temperatura exterior desce para valores abaixo daqueles registados na superfície externa da envolvente, passa a existir um fluxo de calor negativo (convencionando que a energia que sai da envolvente tem sentido negativo) a ser transferido para o meio exterior.

Quando os ganhos internos são acentuados e/ou a radiação solar passa através dos envidraçados, a inércia térmica dos elementos interiores do edifício são responsáveis pela absorção do calor em excesso, diminuindo a temperatura interior, ou evitando que esta suba.

A inércia térmica por si só não trará todos os benefícios expectáveis, há que dimensionar a envolvente com a correta inércia, tendo em conta a orientação da mesma, definir estratégias de ventilação para descarregar a envolvente quando o fluxo de calor atingir a superfície interior da parede, conjugar sistemas que permitam absorver cargas excessivas no espaço climatizado (estação de arrefecimento, onde o proveito está na absorção e dissipação de calor) e aproveitar ganhos internos e solares (estação de aquecimento, onde o proveito está no armazenamento e posterior descarga da carga térmica para dentro do espaço climatizado), algo que pode ser difícil de compatibilizar.

De modo a caracterizar a inércia térmica de um edifício são usadas propriedades dinâmicas, nomeadamente fator de atraso (φ) (42), fator de amortecimento (f) (42), resistência térmica dinâmica (R_d) (44) e definem-se num período de 24 horas em relação à propagação da onda de calor através da envolvente.

$$\varphi = \tau(T_{si_max}) - \tau(T_{se_max}) \quad [h] \quad [\text{eq. 1}]$$

Onde T_{si_max} é a temperatura máxima da superfície interior da parede e T_{se_max} é a temperatura máxima da superfície exterior da parede.

$$f = \frac{(T_{si_max}) - (T_{si_min})}{(T_{se_max}) - (T_{se_min})} \quad [\text{eq. 2}]$$

$$R_d = \frac{\int_0^{24h} |\Delta T| dt}{\int_0^{24h} |q_i| dt} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad [\text{eq. 3}]$$

Onde ΔT é a variação entre a temperatura exterior e interior e q_i o fluxo de calor que atravessa a envolvente.

O fator de atraso permite quantificar o intervalo de tempo que decorre entre os momentos em que as temperaturas máximas se registam na superfície exterior e interior da

parede. Representa o período que a “onda de calor” demora a atravessar o elemento construtivo.

O fator de amortecimento é uma propriedade adimensional calculada pela razão entre a amplitude térmica interior e a amplitude térmica exterior no período de 24h. Quanto menor é o valor, melhor é o comportamento térmico da envolvente.

A resistência térmica dinâmica é uma propriedade que vem do estudo em regime transiente da transferência de calor. Não depende exclusivamente da condutividade térmica e espessura do elemento construtivo, é também função da massa, da capacidade que a parede tem em armazenar calor, sendo contabilizados todos os ganhos e perdas térmicas ao longo do dia. É uma grandeza mais completa do que a resistência térmica, usada em regime estacionário, na avaliação da transferência de calor pela envolvente opaca.

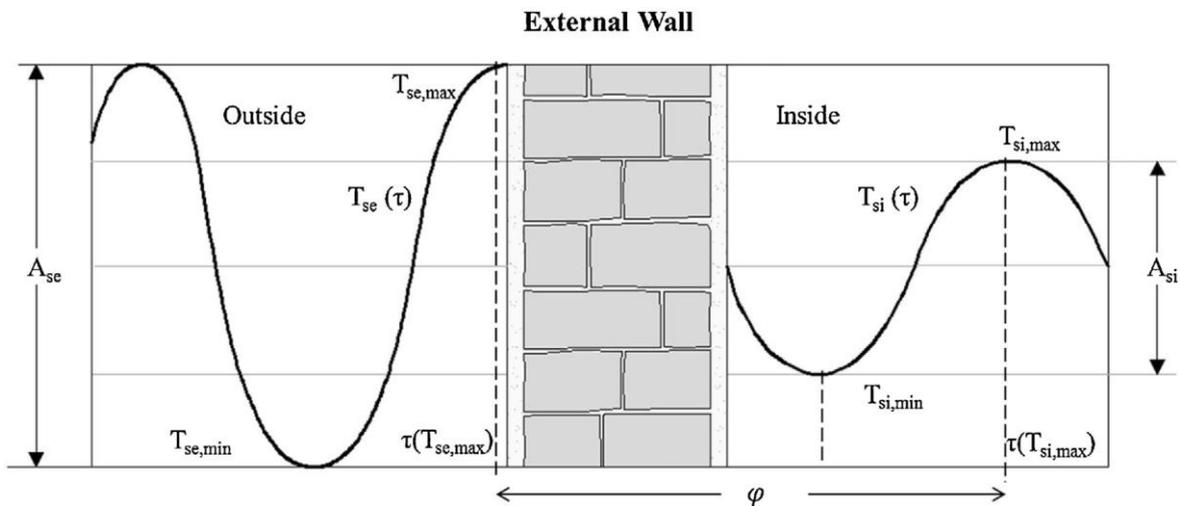


Figura 6 – “Onda de calor” e fatores de inércia térmica (42)

Gagliano et al. (42) avaliou o comportamento térmico dinâmico, durante o Verão, dum edifício com forte inércia térmica, aliado a estratégias de ventilação noturna. O estudo foi efetuado em Itália, o edifício enverga uma envolvente com paredes de 1 metro de espessura, construídas em rocha vulcânica.

Concluiu-se sobre a importância do correto dimensionamento da inércia térmica das paredes exteriores com diferentes azimutes, sendo que as paredes viradas a Este deverão ter uma inércia térmica superior àquelas orientadas para Oeste, de modo a que o fluxo de calor seja retardado até o momento em que o sol se põe, e/ou a temperatura exterior é mais baixa do que a temperatura interior de conforto. É fundamental a necessidade de descarregar totalmente a massa térmica, através de estratégias de ventilação noturna ou outra forma de arrefecimento, para que o ciclo de absorção e libertação de calor ocorra em pleno no dia seguinte.

Al Sanea et al. (44) estudou a influência da inércia térmica num edifício construído em betão pesado na Arábia Saudita, mantendo constante a resistência térmica nominal das

paredes, alterando a espessura da parede compensou-se a variação de resistência com um ajuste na espessura de isolamento térmico. O principal objetivo foi relacionar o potencial de poupança de energia por intermédio da inércia térmica, aumentando a espessura da envolvente. Concluíram que nos meses em que a temperatura exterior, durante todo o dia, é sempre inferior/superior à temperatura *setpoint* estabelecida para o interior, o aumento da inércia térmica não tem efeito nas transmissões diárias de calor. Ao contrário do que acontece nos meses em que no mesmo dia existem tanto cargas de aquecimento como de arrefecimento; neste caso essas cargas tendem a baixar para valores assintóticos ou nulos com o aumento de massa térmica, diminuindo as necessidades de climatização anuais. Verificou-se também que o isolamento exterior, quando comparado com isolamento interior, garante melhores resultados em termos de desempenho térmico da envolvente.

Tonelli et al. (43) evidenciou a importância de necessidade uma inércia térmica razoável em climas temperados a quentes para garantir condições de conforto dentro do espaço climatizado, evitando situações de sobreaquecimento muitas vezes patentes em edifícios leves cuja envolvente não tem a capacidade de absorver grandes quantidades de calor. A análise, efetuada em Itália, teve como objeto de estudo um edifício em madeira, caracterizado com uma fraca inércia térmica, e teve como interesse principal estudar o papel do aumento da inércia térmica nesse edifício leve, bem isolado termicamente, com detalhes construtivos inteligentes que estimulam a ventilação natural e um sombreamento adaptado às condições tanto de Inverno como de Verão. Tubos de alumínio cheios com areia foram adicionados na superfície interior de paredes exteriores, posteriormente à construção do edifício. Interessa que o material em contacto com o ar interior tenha uma elevada condutividade térmica de modo a intensificar a taxa de remoção de calor que se pode acumular no espaço climatizado; e que a massa térmica (areia neste caso) possua um elevado calor específico e densidade. O estudo resultou em conclusões satisfatórias, sendo que o fator de amortecimento medido foi bastante reduzido e o fator de atraso de cerca de 4h.

Inércia térmica – PCM's

Os PCM's (*phase change materials*) são materiais de mudança de fase, capazes de armazenar e libertar grandes quantidades de energia quando a sua temperatura passa do ponto de fusão e cristalização. Os compostos constituintes podem ser orgânicos, à base de parafina ou ácidos gordos, ou inorgânicos, como os sais hidratados. Regra geral os compostos orgânicos são mais estáveis e duráveis, havendo, no entanto, o problema da inflamabilidade da parafina, enquanto os inorgânicos são mais resistentes ao fogo, mas normalmente necessitam da adição de estabilizadores para uniformizar o processo de mudança de fase (45).

A durabilidade dos PCM's é uma característica fundamental, estando sujeitos a mudanças de fase todos os dias durante o período de ocupação do edifício. Quer-se, portanto, que os PCM's mantenham níveis de desempenho ótimo (capacidade da absorção

de calor e estabilidade das temperaturas de mudança de fase) durante a fase de ocupação do edifício, igualando ou ultrapassando o período de vida dos restantes materiais construtivos (45).

Os PCM's demonstram um enorme potencial no melhoramento da inércia dos edifícios leves, apresentando uma grande compatibilidade com tecnologias de construção perfilar (45), dada a sua enorme capacidade de absorver calor sob a forma latente e fácil inclusão na envolvente de um edifício (45–49), seja em macrocápsulas, microcápsulas misturadas em variados materiais construtivos - placas de gesso cartonado (*wallboards*), betão, isolamento térmico, etc.; ou mesmo integrados em sistemas de climatização - pisos radiantes (21), bombas de calor (50), *free-cooling* (18–20), paredes de Trombe (29,32), etc. Estes sistemas funcionam, basicamente, como unidades TES capazes de armazenar calor ou “frio” durante um determinado período de tempo, depois disponibilizado, de forma mais ou menos controlada, com a assistência da circulação (natural ou forçada) de um fluido que permite a carga e descarga dos PCM's.

A redução das necessidades de arrefecimento, diminuição das cargas térmicas em horas de pico, desvio temporal dessas cargas e conseqüente melhoramento das condições de conforto são parâmetros representativos do desempenho dos PCM's aplicados em edifícios (45). O estudo da incorporação de PCM's nos edifícios deve ser realizado o mais próximo possível das condições reais de ocupação, evitando resultados quer subestimados quer superestimados quanto ao desempenho térmico destes materiais (51).

Apesar de em muitas aplicações os PCM's terem a função de controlar processos térmicos de elevada potência, quando empregues em edifícios o principal objetivo é evitar que variações bruscas da temperatura exterior se façam sentir dentro do edifício, atrasando e dissipando ao máximo o fluxo de calor que atravessa a envolvente. Os materiais de mudança de fase devem operar numa base de 24 horas, sendo essencial que a cristalização se dê por completo durante a noite para que na manhã seguinte esteja disponível todo o potencial latente de absorção de energia térmica (45,51).

Diversos estudos realizados por Stetiu e Faustel, Mehling e Cabeza, Kissock e Limas, demonstram a importância da escolha cuidada dos PCM quanto ao local de aplicação e quantidade a usar em relação à área e espessura dos elementos construtivos em que são aplicados (Apud 45) (51).

Uma característica interessante nos PCM's prende-se com a possibilidade de seleccionar a temperatura de fusão e o calor latente do composto de acordo com as condições climáticas da região e operativas de cada edifício, aplicando diferentes PCM's de modo a otimizar o seu desempenho térmico em qualquer estação do ano e para diferentes condições operativas (ganhos internos) do edifício.

Verão: absorvem o calor que entra por condução na envolvente opaca, libertando-o a uma hora mais tardia em que o gradiente entre a temperatura interior e exterior propicie um fluxo térmico de dentro para fora, diminuindo a carga que normalmente entraria no espaço climatizado e que seria impossível de eliminar de forma passiva enquanto a temperatura

exterior fosse superior à interior, diminuído assim as necessidades de arrefecimento. Mesmo o calor indesejado que atinge a superfície interior da envolvente, será dissipado por recurso a estratégias de ventilação (que pode ser natural, caso (provável) a temperatura ambiente exterior seja inferior à temperatura interior).

Inverno: armazenam o calor proveniente de ganhos internos e solares para mais tarde ser libertado. Estabelecendo-se a temperatura de conforto, e havendo PCM's em contacto com o ar interior, cuja temperatura de fusão é marginalmente inferior a esse *setpoint*, o calor que seria normalmente conduzido ao exterior fica retido sob a forma latente. Assim, quando a temperatura interior baixar do ponto de solidificação dos PCM's, estes cristalizam, libertando calor para dentro do espaço climatizado, minimizando as necessidades de aquecimento.

No entanto, para além do controlo da temperatura interior, os PCM's têm outras potencialidades passivas, se bem projetados.

No Verão, por vezes a manutenção do conforto térmico não basta, nem faz sentido, porque esse conforto não existe; ganhos solares que entram pelos envidraçados e ganhos internos elevados, são situações que podem gerar sobreaquecimento do espaço climatizado, principalmente se as superfícies interiores da envolvente e das partições forem isolantes. Os PCM's são materiais com uma reduzida condutividade térmica, o que dificulta a elevada taxa de transferência de calor, por vezes necessária para retirar passivamente a carga térmica do ar interior. Existem, no entanto, formas de melhorar esta fraca propriedade, como a inserção dos PCM's em matrizes e espumas metálicas (e.g.: cobre) de elevada condutividade térmica, mistura do composto com frações de grafite e partículas microscópicas de alumínio (51).

As propriedades térmicas dos PCM's devem ser medidas e representadas em função da temperatura; uma curva de entalpia permite calcular a capacidade de armazenamento de calor (45) e a condutividade térmica varia com a temperatura e conseqüente mudança de fase do material, sendo assim dificultado qualquer balanço térmico em regime estacionário.

Um aspeto positivo dos materiais de mudança de fase é precisamente a forma como armazenam e libertam calor. Para além de possuírem um calor latente muito alto, as transferências térmicas ocorrem a temperaturas mais ou menos constantes, o que é de grande utilidade em aplicações onde as variações de temperatura são indesejadas, como é o caso dos edifícios. Assim, enquanto se dá a mudança de fase, a superfície interior da envolvente mantém-se a uma temperatura estável, minimizando o gradiente térmico que intensificaria a convecção natural (no caso em que se quer evitar a entrada de carga térmica por condução), ou maximizando o gradiente, aumentando a potência calorífica que é retirada do espaço interior.

No entanto, a pequena variação de temperatura aquando da mudança de fase é intensificada com a mistura de aditivos (estabilizadores de forma, uniformização da mudança de estado físico, retardantes de fogo) e com a reduzida percentagem de massa de PCM's em microcápsulas, e pode originar o fenómeno *supercooling effect* (Figura 7) que faz com que a gama de temperaturas de fusão e solidificação sejam diferentes (mais baixas

para a solidificação), obrigando assim a um perfil de temperaturas operantes mais extenso, o que não é benéfico, dado que a temperatura de mudança de fase deve ser tanto mais estreita e mais próxima possível da temperatura de conforto (45).

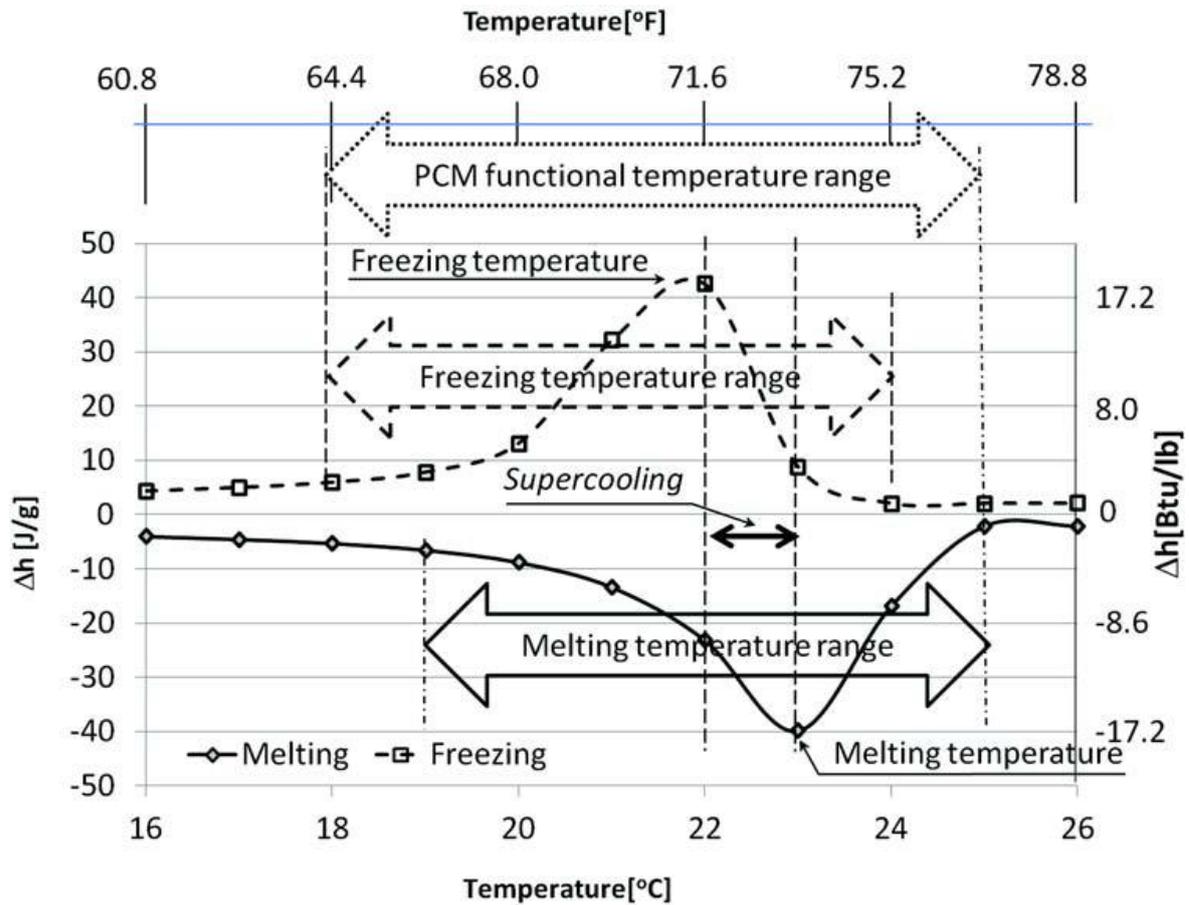


Figura 7 - Efeito *supercooling* (45)

Košný et al. (45) conduziu um estudo durante a estação de arrefecimento onde 30% da massa de isolamento térmico de fibra de vidro foi substituído por PCM's microencapsulados com uma temperatura de fusão de 27°C . Foram definidas duas temperaturas *setpoint* constantes de 20°C ou 25°C , duas espessuras da camada de isolamento de 0,14 m ou 0,30 m. Nestas condições, a temperatura *setpoint* de 25°C e a camada de 0,30 m provaram ser uma melhor estratégia, resultando numa diminuição superior a 70% das necessidades de arrefecimento, mais de 80% na redução das cargas de climatização em horas de pico e 11 horas de deslocamento das cargas de pico. Durante 70% do período diário existiu um fluxo de calor de dentro para fora que foi útil para arrefecer passivamente o espaço climatizado, reduzindo as cargas de arrefecimento do sistema AVAC. Conclui-se que é benéfico escolher um PCM com uma temperatura de mudança de fase mais próxima da temperatura *setpoint*.

Pomianowski et al. (51) efetuou um revisão intensiva de estudos publicados sobre a aplicação de PCM's como unidades TES em edifícios. A análise envolveu a inclusão de PCM's em elementos construtivos – painéis de gesso cartonado, cimento, tijolo cerâmico, materiais compósitos, envidraçados; em sistemas ativados termicamente – onde um fluido circula forçadamente pelo interior dos elementos construtivos, descarregando a energia térmica acumulada pelos PCM's; em equipamentos AVAC e permutadores de calor. Estudos demonstraram: que é possível combinar até 45% (em massa) de PCM's em materiais de gesso, 60% em *wallboards* compósitos, e apenas 6% em materiais cimentícios; que a incorporação de PCM's em edifícios leves resultou numa diminuição de temperatura de pico em 3°C, sendo que esta diferença não se verifica em edifícios com elevada inércia térmica; PCM's em estado sólido apresentam uma transmissividade mais baixa do que a do vidro, comprometendo a qualidade de luz visível que entra no edifício; em relação a sistemas ativados termicamente, o maior entrave à eficaz transferência de calor é devido à baixa condutividade térmica dos PCM's, sendo necessário otimizar essa propriedade. Falta validação experimental dos modelos teóricos, implementação prática das estratégias em situações reais de ocupação do edifício, havendo, também, alguma carência de estudos de viabilidade económica e aplicabilidade real.

Soares et al. (46) avaliou o desempenho térmico e energético, em diversos climas, de painéis de gesso cartonado com PCM's incorporados em relação às necessidades mensais e anuais de climatização num edifício residencial LSF de zona única, equipado com um sistema AVAC. A análise foi efetuada com recurso à ferramenta de simulação dinâmica *EnergyPlus* à qual foram aplicados algoritmos de otimização do programa *GenOpt*. As variáveis assumidas no estudo foram a temperatura de fusão do PCM, espessura dos painéis, absorvidade da superfície interior do painel e orientação da envolvente e cobertura. Determinou-se que: a temperatura de fusão ideal varia consoante a orientação da envolvente; uma maior absorvidade é ótima para climas mais frios, reduzindo as necessidades de aquecimento; o *wallboards* de maior espessura assumida (4 cm) foi aquele que obteve melhores resultados. Os resultados indicaram uma solução ótima para cada clima e que os PCM's em placas de gesso cartonado são especialmente eficazes em climas mediterrânicos, onde se demonstra uma poupança máxima de energia de climatização na ordem dos 62%.

1.3.2 Ferramentas computacionais

O estudo do desempenho térmico e energético de um edifício pode ser efetuado de forma experimental, onde o edifício é parametrizado e equipado com um conjunto de instrumentos de medição de consumos energéticos, fluxos de calor, temperatura, etc.; ou através de ferramentas computacionais, onde se cria um modelo virtual situado numa determinada região, sujeito a um determinado perfil de ocupação, construído e equipado de determinada forma, que é processado numericamente e cujos resultados da simulação (*outputs*) são dependentes das variáveis de entrada (*inputs*).

A forma de apurar a precisão de resultados e funcionalidade do *software*, está patente na sua acreditação pela norma ASHRAE 140 (52), que avalia o programa, validando os resultados obtidos na simulação dinâmica através da comparação com casos de estudo definidos na norma. Dentro dos programas acreditados pela ASHRAE 140, incluem-se, por exemplo, o TRANSYS (53), HAP (54), *DesignBuilder/EnergyPlus* (55).

O *software DesignBuilder* é um programa de pré-processamento e modelação de edifícios com uma interface gráfica bastante dinâmica e intuitiva, e cujo motor de cálculo opera com as mesmas ferramentas de cálculo e algoritmos que o *EnergyPlus*, aquele que um dos programas de simulação dinâmica mais intensivamente usados pela comunidade científica.

Uma funcionalidade importante dentro do *EnergyPlus*, é a sua capacidade de replicar o comportamento dos PCM's aplicados na envolvente do edifício e em sistemas de climatização. A simulação destes materiais é particularmente complexa, devido às constantes alterações de propriedades termofísicas dos PCM's com a variação de temperatura e conseqüente mudança de fase. Assim, o *CondFD* é o algoritmo de condução unidimensional de diferenças finitas destinado ao processamento dos PCM's e foi validado por Tabares-Velasco et al. em casos testes, onde foram efetuadas verificações analíticas, testes comparativos e validações empíricas (Apud 46).

Tabares-Velasco et al. concluíram que o incremento temporal definido no *EnergyPlus* na simulação dos PCM's não deverá ser superior a 3 minutos para se conseguirem resultados precisos numa base horária (Apud 46).

O *EnergyPlus* não considera a histerese^e nem a variação de densidade dos PCM's, o que pode originar alguma falta de precisão nos resultados, principalmente, em aplicações com macrocápsulas, onde a variação de volume aquando da mudança de fase é significativa, provocando uma alteração na taxa de transferência de calor por convecção que não irá ser contabilizada (46).

Quando existe a necessidade de testar variadas soluções construtivas, onde demasiados parâmetros são variáveis, o tempo de processamento pode revelar-se incompatível com os objetivos temporais traçados, e para cumprir com esses objetivos, poderá ficar de fora a solução ótima, devido à necessária simplificação do problema.

O *GenOpt* (56) é uma ferramenta que contém uma série de algoritmos de otimização, cujo objetivo é minimizar a função-custo de um problema gerado num programa de simulação dinâmica externo, como o *EnergyPlus*. O *GenOpt* lê os *outputs* da simulação do *EnergyPlus* e define automaticamente um novo conjunto de *inputs* que diminuem o custo da função a estudar, é desenvolvido um cálculo iterativo até os resultados convergirem, atingindo-se o mínimo da função (46).

^e Relacionado com o termo inércia no seu sentido lato; é a capacidade de um material ou sistema em manter as suas propriedades físicas atuais aquando duma súbita mudança no estímulo que as gerou.

1.3.3 Legislação, Regulamentos e Normas

A diretiva EPBD Reformulada (2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010) fortalece e atualiza os requisitos térmicos da envolvente opaca e dos vãos envidraçados, e cria exigências a nível da eficiência energética dos principais sistemas, indo ao encontro das metas e desafios acordados entre os Estados-Membro para 2020 (redução em 20% das emissões de gases com efeito de estufa em relação aos indicadores de 1990, redução de 20% do consumo energético, e estipulação de 20% do total da energia consumida como sendo de origens renováveis) (1). Assim, os requisitos e a avaliação do desempenho térmico de um edifício passam a assentar fundamentalmente no comportamento térmico e eficiência dos sistemas energéticos e são definidos requisitos específicos a cumprir em edifícios novos, edifícios existentes e edifícios sujeitos a intervenção.

O conceito nZEB (*nearly zero-energy building*) tem por base edifícios com um muito elevado desempenho energético, sendo que as (reduzidas) necessidades energéticas deverão ser maioritariamente suprimidas por fontes renováveis, incluindo energia renovável produzida localmente. Estes edifícios passarão a constituir um paradigma a partir de 2020 (2018 para edifícios públicos) a acrescentar ao requisito, que já é atualmente imposto, de construir todos os novos edifícios numa base de custo-ótimo, efetuadas exceções para o caso de edifícios que se aproximem das necessidades quase nulas antes de 2020 (1).

Para assegurar uma implementação facilitada e transição suave, os requisitos técnicos associados aos conceitos nZEB e custo-ótimo poderão aproximar-se, de modo a que se sobreponham e coexistam na mesma gama de consumos energéticos – custo dos sistemas e preço da energia são dois fatores que alteram as duas curvas (investimento e custo de operação) que perfazem o CCV do edifício. Deve, então, haver incentivos à inovação tecnológica dos principais sistemas consumidores de energia, diminuindo o custo da tecnologia, para encurtar ao máximo a diferença entre os edifícios considerados de custo-ótimo e de necessidades quase nulas (57).

Existe uma grande discrepância por parte dos estados-membro da EU em termos daquilo que define um edifício nZEB. Metodologias de cálculo, requisitos mínimos de energia primária consumida, equipamentos consumidores de energia, apresentam-se sem consenso generalizado entre os diversos países. Mesmo entre países com climas semelhantes e comparando edifícios do mesmo género, os índices mínimos de energia primária consumida variam grandemente, mostrando não só a falta de convergência nas definições, mas também a diferença de ambições no cumprimento das metas da EPBD. Impõe-se a necessidade de estipular diretrizes de forma a uniformizar os requisitos que definem o nZEB, permitindo a comparação direta entre edifícios construídos em países diferentes através da qualificação do desempenho energético dos mesmos (58).

A experiência adquirida ao longo dos 7 anos em que o Decreto-Lei nº 78/2006, Decreto-Lei nº 79/2006 e Decreto-Lei nº80/2006 estiveram em vigor, traduziu-se na eficácia do

sistema de certificação energética e permitiu apontar aspetos cuja aplicação prática se demonstrou passível de melhoria. Assim, e com a publicação da Diretiva nº 2010/31/EU, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010 (i.e.: EPDB), houve a necessidade de atualizar o sistema de certificação energética, criando para o efeito, num único diploma (Decreto-Lei nº118/2013) o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) (59).

Os pilares na definição dos requisitos e avaliação do desempenho energético dos edifícios passam a assentar fundamentalmente no comportamento térmico e na eficiência de sistemas, no caso de edifícios de habitação, acrescentando a instalação, condução e manutenção destes últimos para o caso de edifícios de comércio e serviços. São definidos requisitos específicos para a aplicação do regulamento em edifícios novos, edifícios sujeitos a grande intervenção e edifícios existentes (59).

Para além de requisitos de qualidade térmica atualizados, o regulamento prevê padrões mínimos de eficiência energética para os sistemas de climatização, preparação de águas quentes sanitárias (AQS), iluminação e aproveitamento de energias renováveis. Promove-se a aplicação de sistemas e soluções passivas, também em relação à qualidade do ar interior, na manutenção de níveis mínimos de poluentes atmosféricos, saúde e bem-estar dos ocupantes, e privilegiam-se as estratégias de ventilação natural em detrimento da ventilação mecânica, numa perspetiva de otimização de recursos, eficiência energética e redução de custos (59).

Dependendo da zona climática em Portugal continental, relativamente a edifícios novos, os valores do coeficiente de transmissão térmica ($U_{ref} [\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$) variam entre 0,5 e 0,25 em elementos da envolvente opaca exterior; 0,6 e 1 em elementos da envolvente opaca interior; 2,4 a 2,9 em vãos envidraçados; 0,5 em elementos em contacto com o solo. Estes requisitos têm uma alteração prevista para 2016, podendo ainda ser progressivamente atualizados até 2020 caso análises de custo-benefício o justifiquem, indo ao encontro dos valores ótimos que melhor garantam a simultânea classificação de um edifício numa base de custo-ótimo e de necessidades energéticas quase nulas (60).

Dependendo da zona climática em Portugal continental e da classe de inércia térmica do edifício, os fatores solares máximos admissíveis variam de 0,15 a 0,5 (60).

Está previsto um mínimo de 0,4 renovações de ar por hora (60) para efeito de cálculos térmicos, havendo valores mínimos de caudal de ar novo em função da ocupação e da área do edifício, sendo que esses valores variam entre os $16 \text{ m}^3/(\text{hora.pessoa})$ e os $98 \text{ m}^3/(\text{hora.pessoa})$, e entre $2 \text{ m}^3/(\text{hora.m}^2)$ e $5 \text{ m}^3/(\text{hora.m}^2)$, consoante a atividade executada no espaço e consoante a taxa metabólica dos ocupantes e consoante a emissão de poluentes específicos resultante da atividade praticada no edifício (61).

1.3.4 Síntese

Da revisão bibliográfica realizada pode-se concluir que existe um extenso interesse em aprofundar o conhecimento científico na área do comportamento térmico de edifícios, havendo uma grande incidência nas técnicas passivas de climatização. Dessas técnicas destacam-se:

- *Free cooling* (18–20);
- Piso radiante (21);
- Chaminé solar acoplada com permutador de calor geotermal (23);
- Paredes de Trombe (24–32);
- Coberturas e paredes ajardinadas (33–37);
- Sombreamento (39–41);

Foi dado um maior destaque ao estudo da inércia térmica quanto à sua importância na manutenção das condições de conforto no interior de um edifício e quanto ao seu contributo na redução das necessidades de climatização de aquecimento e arrefecimento. A bibliografia (42–44) mostra uma tendência significativa em abordar o problema num contexto de fortes cargas térmicas, avaliando o contributo da inércia em situações de possível sobreaquecimento. Nas conclusões dos trabalhos lidos existe sempre um consenso quanto ao benefício de uma forte inércia térmica na diminuição das necessidades de climatização ou das horas de desconforto, sendo, no entanto, necessário dimensionar a quantidade e localização de massa térmica a usar no edifício, dependendo das condições operacionais e implantação do edifício.

Durante a revisão bibliográfica, os PCM's surgiram abundantemente nas pesquisas realizadas, apresentando-se como materiais, que apesar de leves na sua natureza, apresentam uma grande capacidade térmica, tornando-os interessantes em inúmeras aplicações que exijam absorção e libertação de calor – e os elementos construtivos de um edifício constam nessas aplicações. Assim, há um grande número de trabalhos que se focam no estudo e otimização das propriedades termofísicas destes materiais para que possam operar durante milhares de ciclos de cargas e descargas sem perder as propriedades, nem constituir qualquer perigo em termos de vazamento e inflamabilidade (45); trabalhos que estudam o comportamento térmico de elementos construtivos com PCM's incorporados (45–49); e trabalhos que aliam a massa térmica dos materiais de mudança de fase a sistemas de climatização (18–21,29,32,50). Problemas de cariz económico e a baixa condutividade térmica dos PCM's – que leva a uma mudança de fase parcial e conseqüente desaproveitamento do calor latente disponível – são questões comuns aquando das conclusões dos trabalhos.

1.4 Contributo da dissertação

O estudo da otimização do desempenho térmico de edifícios é uma área extensíssima, onde inúmeros autores contribuem para o aprofundamento do conhecimento científico, possibilitando, cada vez mais, a aplicação de técnicas e tecnologias de elevada eficiência energética, reduzindo os consumos dos sistemas AVAC e que tornem o edifício numa máquina ecoeficiente.

O contributo esperado com esta tese foca-se, essencialmente, no melhoramento do comportamento térmico de edifícios do tipo LSF pelo aumento de massa térmica no interior do edifício.

Pretende-se avaliar a importância da inércia térmica de edifícios construídos em clima mediterrânico no controlo e manutenção das condições de conforto, evitando consumos energéticos de climatização, em situações de reduzida e elevada carga térmica interna. Essa avaliação será estabelecida, numa primeira fase, através da comparação entre o comportamento térmico de um edifício construído pela técnica LSF - fraca inércia - e outro de construção convencional (alvenaria de tijolo cerâmico e betão armado) – forte inércia.

Pretende-se determinar qual o benefício na adição de massa térmica em diferentes elementos construtivos individualmente – paredes exteriores, cobertura e paredes interiores -, caracterizando a inércia térmica e o seu contributo especificamente para cada combinação de elementos com diferentes massas.

Com os resultados apurados, o objetivo foca-se na avaliação de uma estratégia de melhoria aplicável ao edifício LSF para que este iguale ou supere o edifício convencional em termos de comportamento térmico.

Os contributos finalizam-se com uma análise energética e económica simplificada dos edifícios LSF e convencional para duas condições de cargas térmicas internas (reduzidas e relevantes). Objetiva-se determinar qual das técnicas e respetivas soluções construtivas se apresenta mais eficiente do ponto de vista energético e económico, considerando, para tal, o custo de investimento inicial do edifício e o custo de operação acumulado numa base de 20 anos.

Em resumo, pretende-se:

- i. Caracterizar o comportamento térmico de edifícios construídos recorrendo à técnica LSF, comparando-o com o comportamento térmico de edifícios construídos recorrendo a técnicas convencionais.
- ii. Identificar quais os elementos construtivos onde é mais benéfico adicionar massa térmica com vista a reduzir as necessidades de climatização anuais de um edifício.
- iii. Definir uma estratégia para melhorar o comportamento térmico do edifício LSF pela incorporação de massa térmica.

- iv. Realizar uma análise energética e económica simplificada ao edifício LSF e convencional sob condições de forte e fraca carga térmica interna, identificando as soluções ótimas em cada caso de estudo e concluindo quanto ao método construtivo mais eficaz do ponto de vista energético e económico.

1.5 Organização do documento

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos.

O primeiro capítulo “Introdução” contextualiza a problemática motivadora para o trabalho efetuado; traça objetivos gerais a cumprir; efetua uma revisão bibliográfica ao trabalho de autores que contribuíram para o conhecimento técnico e científico nas áreas pertinentes a este projeto; e apresenta os contributos fundamentais que são ambicionados com o desenvolvimento da tese.

O segundo capítulo “Comportamento Térmico de Edifícios do Tipo LSF e Convencional (uma análise comparativa)” caracteriza soluções construtivas comuns; define o caso de referência, caracterizando todos os aspetos associados à edificação do modelo construtivo virtual LSF e convencional; e faz uma análise crítica dos resultados, recorrendo a indicadores de desempenho térmico e energético.

O terceiro capítulo “Inércia e Resistência Térmica no Estudo e Otimização do Desempenho Térmico de Edifícios” estuda o potencial de poupança energética pelo aumento de massa térmica em diferentes elementos construtivos e define uma estratégia de otimização térmica a aplicar ao edifício LSF.

O quarto capítulo “Otimização Energética e Económica” conduz uma análise simplificada, com vista a determinar as soluções construtivas mais eficientes do ponto de vista energético e económico.

O quinto capítulo “Conclusões” apresenta o leque de conclusões traçadas ao longo do desenvolvimento do projeto e lança sugestões para trabalhos futuros que poderão completar a tese noutras vertentes.

O sexto capítulo “Referências Bibliográficas” enumera a bibliografia consultada durante a presente dissertação.

O sétimo capítulo “Anexos” apresenta o conjunto de tabelas referenciadas ao longo do texto que se consideraram demasiado densas ou repetitivas para surgirem no corpo da tese.

Capítulo 2

2 Comportamento Térmico de Edifícios do Tipo LSF e Convencional

2.1 Sumário

Capítulo cujo principal objetivo é estudar, com recurso à ferramenta de simulação dinâmica *DesignBuilder* versão 4.2.0.034, o comportamento térmico de um edifício de construção LSF – caracterizado pela baixa inércia térmica - e outro convencional – caracterizado pela forte inércia térmica.

Apresentar-se-á um pequeno conjunto de soluções construtivas comuns, passando depois à definição do caso de referência em estudo, onde os modelos serão descritos na íntegra quanto aos pressupostos iniciais e parâmetros selecionados no *DesignBuilder*: implantação e dados climáticos, caracterização geométrica e dimensional, caracterização das opções construtivas, caracterização das condições operacionais e caracterização de equipamentos e sistemas.

Será feita uma análise comparativa crítica de resultados, auxiliada por indicadores de desempenho térmico e energético entre os dois modelos que estarão sujeitos, exatamente, às mesmas condições operacionais e climatéricas; serão consideradas duas situações de cargas térmicas internas: reduzidas e relevantes, pretendendo simular o funcionamento, respetivamente, de um edifício residencial e outro de comércio/serviços.

2.2 Caracterização de soluções construtivas comuns

Apresentam-se três soluções construtivas comuns que variam nos materiais e técnicas empregues na construção do edifício:

- LSF
- Convencional
- Betão armado

LSF

O método LSF foi descrito no capítulo 1.1.3 e a tabela seguinte caracteriza os elementos construtivos, com a respetiva combinação (possível) de materiais empregues, que resultam numa solução típica. A primeira coluna identifica os elementos construtivos e respetivos coeficientes de transmissão térmica ($U_{0,4}$ significa $U=0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).

A condutividade térmica, calor específico e densidade dos materiais que constituem os elementos do edifício são valores da base de dados do *DesignBuilder/EnergyPlus*.

Tabela 1 - Materiais construtivos do edifício LSF e respetivas propriedades térmicas e físicas relevantes

	Material	Condutividade térmica k [$W/(m.K)$]	Calor específico c_p [$J/(kg.K)$]	Densidade ρ [kg/m^3]	Espessura e [cm]
Paredes exteriores U0,4	Reboco	0,50	1000	1300	1,90
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,63
	OSB	0,13	1700	650	1,50
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30
Cobertura U0,4	Rufo metálico	0,29	1000	1250	0,07
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,76
	OSB	0,13	1700	650	1,50
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30
Pavimento U0,5	Soalho de madeira	0,14	1200	650	3,00
	Betão de regularização	0,41	840	1200	7,00
	Betão celular	0,23	840	700	10,00
	Espuma isolante	0,04	1400	10	5,27
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,00
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30

Na presente tabela não é mostrado nenhum elemento estrutural do edifício, faltando os perfis metálicos que envergam a envolvente, de espessura entre 1,5 e 2 mm e espaçados de 600 em 600 mm. Os perfis não constam na caracterização, uma vez que não se tratam de um elemento contínuo e não fazem parte da grande maioria dos cortes transversais da envolvente. No entanto, constituem pequenas pontes térmicas que neste trabalho foram desprezadas – pequenas porque para além da reduzida espessura dos perfis, estes não interrompem a camada de isolamento, interrompem a caixa-de-ar (não representada na tabela) -, levando a uma ligeira subestimação da espessura de isolamento necessário para o U definido.

Convencional

O método convencional representa a realidade construtiva generalizada em Portugal, desde a década de 70 do século XX. Na sua edificação, a estrutura do edifício é composta por pilares, colunas, vigas e lajes de betão armado, sendo o espaço livre entre elementos estruturais preenchido com alvenaria de tijolo cerâmico, dando a forma ao edifício.

A tabela seguinte caracteriza os elementos construtivos, com a respetiva combinação (possível) de materiais empregues, que resultam numa solução típica.

Tabela 2 - Materiais construtivos do edifício convencional e respetivas propriedades térmicas e físicas relevantes

	Material	Condutividade térmica k [$W/(m.K)$]	Calor específico c_p [$J/(kg.K)$]	Densidade ρ [kg/m^3]	Espessura e [cm]
Paredes exteriores U0,4	Reboco	0,50	1000	1300	1,90
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,72
	Alvenaria tijolo cerâmico	0,62	800	1700	15,00
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30
Cobertura U0,4	Telha cerâmica	1,00	800	2000	2,50
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,71
	Laje de betão armado	2,30	1000	2300	20,00
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30
Pavimento U0,5	Soalho de madeira	0,14	1200	650	3,00
	Betão de regularização	0,41	840	1200	7,00
	Betão celular	0,23	840	700	10,00
	Espuma isolante	0,04	1400	10	5,27
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30
	Alvenaria tijolo cerâmico	0,62	800	1700	10,00
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30

Na presente tabela não é mostrado nenhum elemento estrutural do edifício, e apesar de não serem contínuos, apresentam uma área da envolvente substancialmente maior do que no caso do edifício LSF.

Esses elementos constituem pequenas pontes térmicas que neste trabalho foram desprezadas – pequenas porque estes não interrompem a camada de isolamento, interrompem a alvenaria de tijolo cerâmico -, levando a uma ligeira subestimação da espessura de isolamento necessário para o U definido.

Não é muito usual revestir as superfícies interiores das paredes e cobertura de um edifício convencional com painéis cimentícios, mas considerou-se importante, antevendo a simulação dinâmica a que os modelos vão estar sujeitos, definir os mesmos materiais de acabamento cujas propriedades termofísicas influenciam diretamente a transferência térmica a que o ar interior é sujeita.

Betão armado

No caso de um edifício construído totalmente em betão armado, toda a envolvente exterior é estrutural, não sendo necessário nenhuma descontinuidade dos materiais que constituem o edifício, eliminando as pontes térmicas. A muito forte inércia térmica é característica deste tipo de construção.

Tabela 3 - Materiais construtivos do edifício “betão armado” e respetivas propriedades térmicas e físicas relevantes

	Material	Condutividade térmica k [$W/(m.K)$]	Calor específico c_p [$J/(kg.K)$]	Densidade ρ [kg/m^3]	Espessura e [cm]
Paredes exteriores U0,4	Reboco	0,50	1000	1300	1,90
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	8,15
	Betão armado	2,30	1000	2300	30,00
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30
Cobertura U0,4	Telha cerâmica	1,00	800	2000	2,50
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,56
	Laje de betão armado	2,30	1000	2300	30,00
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30
Pavimento U0,5	Soalho de madeira	0,14	1200	650	3,00
	Betão de regularização	0,41	840	1200	7,00
	Betão celular	0,23	840	700	10,00
	Espuma isolante	0,04	1400	10	5,27
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30
	Betão	1,13	1000	2000	10,00
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30

Nos elementos apresentados acima, surge uma combinação de materiais algo redundante, ao revestir-se as superfícies interiores dos elementos construtivos com painéis cimentícios. Apesar de não ser descabido é pouco comum, e mais uma vez, a solução

apenas foi adotada por uma questão de normalização dos materiais de revestimento que estão em contacto com o espaço interior climatizado.

Um dado importante na caracterização de soluções construtivas resulta do somatório das massas de cada elemento construtivo sobre a área útil de pavimento do edifício, dando resultado à massa útil.

$$M_u = \frac{\sum (A_e \cdot \rho_m \cdot e_m)}{A_u} \quad [kg/m^2] \quad [\text{eq. 4}]$$

Em que, A_e é a área de cada elemento construtivo - paredes exteriores, cobertura, pavimento e paredes interiores -, ρ_m e e_m são, respetivamente, a densidade e a espessura de cada material que constitui o cada elemento, e A_u é a área útil de pavimento do edifício.

Para o cálculo de M_u não é considerada a massa do isolamento térmico que, pela sua natureza, apresenta uma densidade muito reduzida.

O pavimento foi deixado fora da equação.

Tabela 4 - Massa útil dos edifícios construídos recorrendo às diferentes técnicas

Massa útil [kg/m^2]		
LSF	Convencional	Betão
136,87	1098,78	1896,45

2.3 Definição de caso de referência

O caso de referência é definido por um edifício de tipologia T1, modelado com duas soluções construtivas – LSF e convencional - e sujeito a duas condições distintas de cargas térmicas internas – reduzidas e relevantes.

2.3.1 Implantação e dados climáticos

Segundo a revisão bibliográfica, a inércia térmica tem um maior benefício em regiões quentes com amplitudes térmicas diárias consideráveis, assim, e para intensificar o efeito da inércia térmica é importante implantar o edifício num clima onde os ganhos solares sejam significativos e as temperaturas máximas elevadas. A estação de aquecimento não deve ser demasiado amena, não descontando a relevância das necessidades de aquecimento.

O edifício foi implantado em Évora (ficheiro climático PRT_EVORA_IWEC), sendo uma das regiões, em Portugal, com o clima mais exigente e onde a inércia térmica deverá

ter uma função mais destacada no comportamento térmico do edifício, amplificando as diferenças entre o edifício LSF e o edifício convencional.

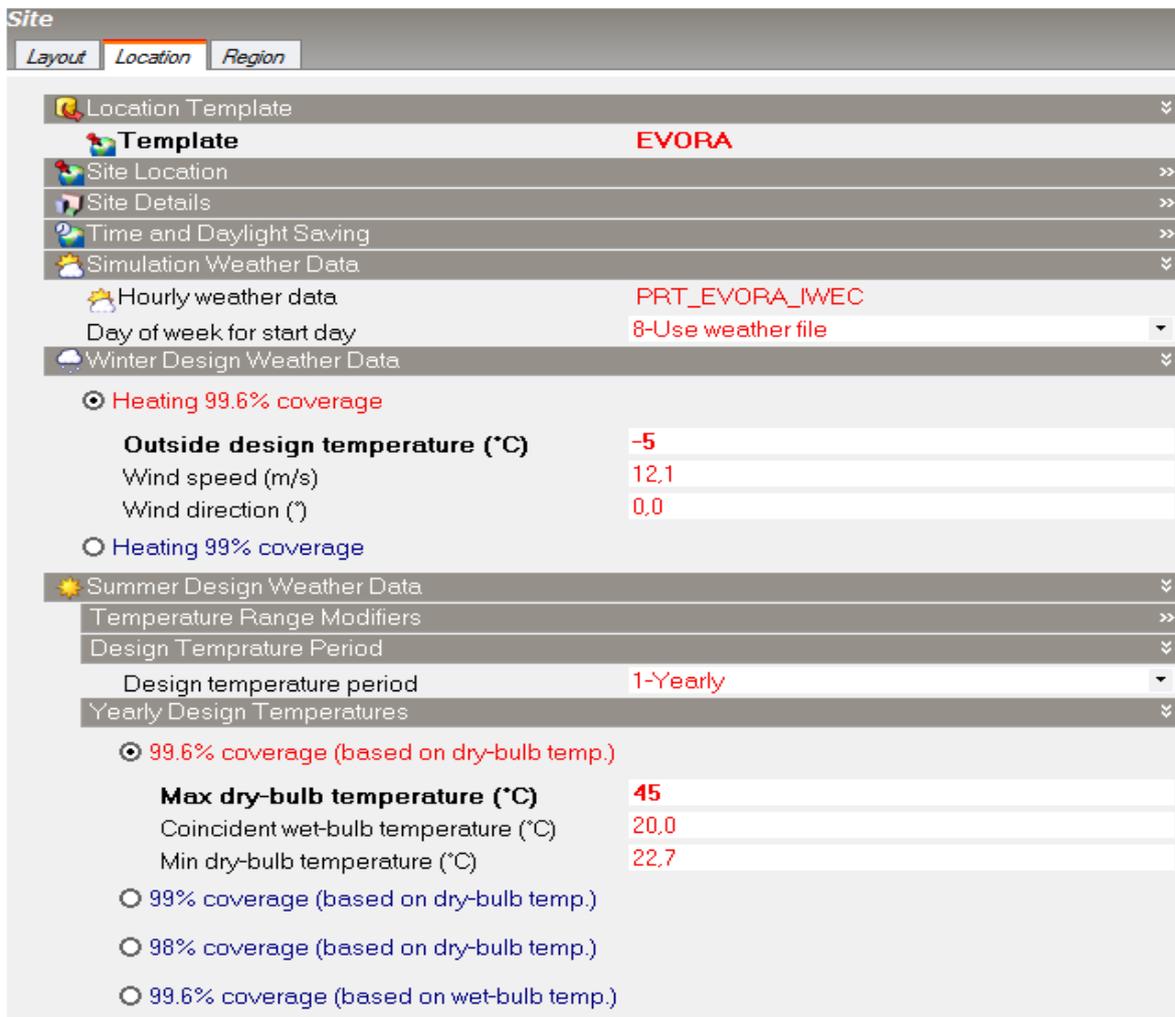


Figura 8 - Separador do *DesignBuilder* com a implantação do modelo

2.3.2 Caracterização geométrica e dimensional

O projeto de arquitetura (62) de uma casa executada em LSF, serviu de base para a modelação do edifício virtual, e todas as simulações dinâmicas foram realizadas em modelos idênticos do ponto de vista geométrico e dimensional.

Características:

- Área de implantação: 91,64 m²
- Área útil de pavimento: 83 m²
- Nº de pisos: 1
- Tipologia: T1

A cobertura tem uma pendente de 12%, e o pé-direito varia dos 2,34 m aos 3,20 m.

A envolvente exterior vertical tem uma área de 120,2 m², cujos 16% são envidraçados. A cobertura possui uma área de 91,2 m².

As paredes de compartimentação interior têm uma área de 56 m².

Foram executadas palas de sombreamento totalmente opacas com 1 m de comprimento que protegem as fachadas sul e este de ganhos solares excessivos.

Dada a pequena dimensão do edifício, e não havendo espaços interiores com requisitos térmicos especiais, considerou-se o edifício como monozona, simplificando os cálculos e a análise da simulação dinâmica.

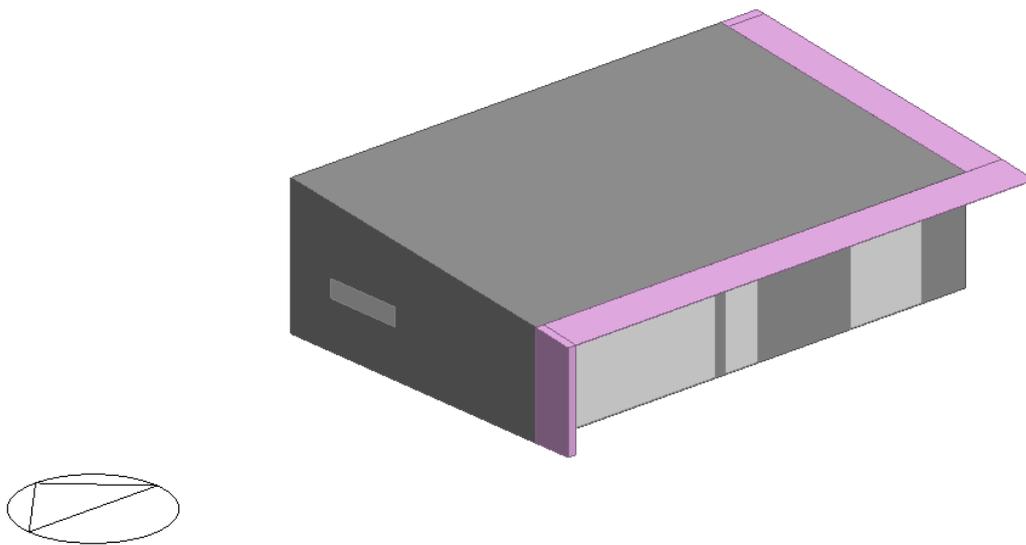


Figura 9 - Perspetiva sul e oeste do edifício modelado no *DesignBuilder*

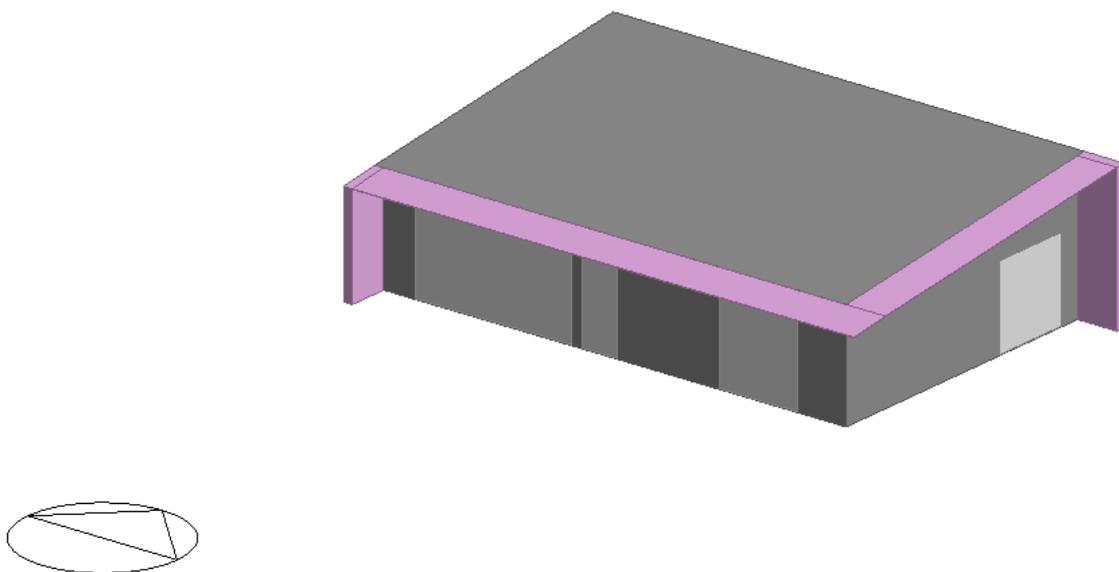


Figura 10 - Perspetiva sul e este do edifício modelado no *DesignBuilder*

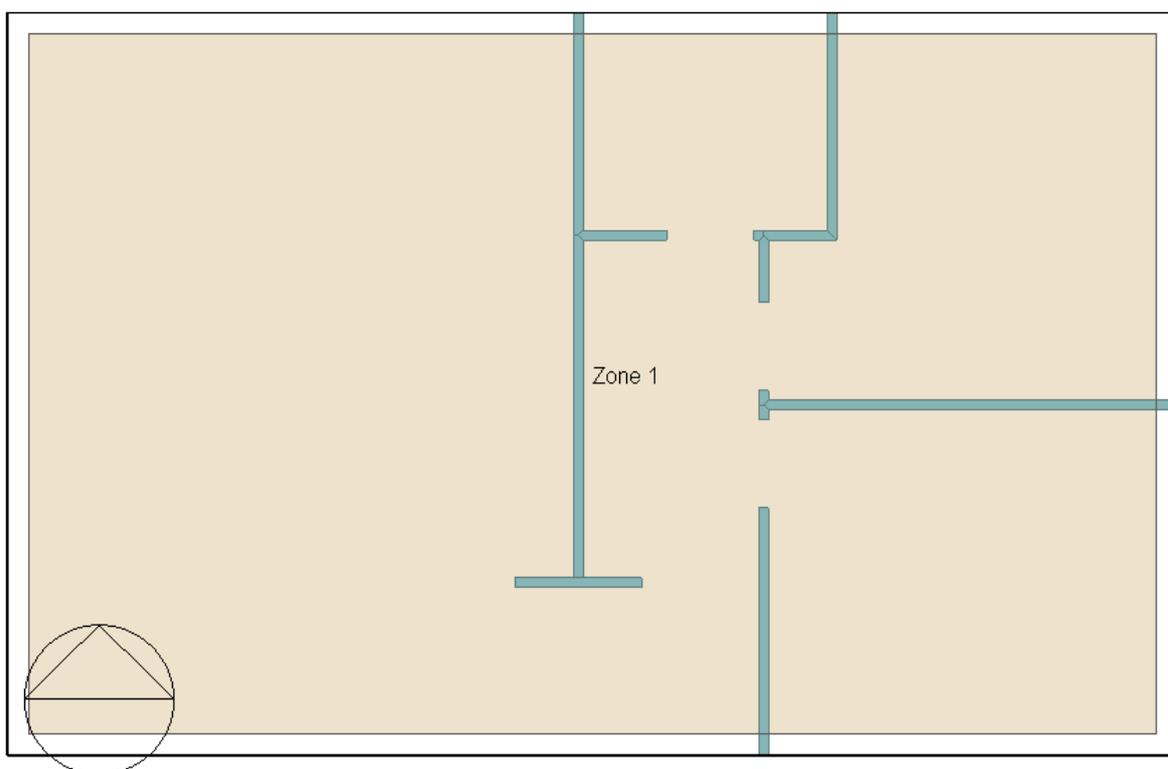


Figura 11 - Planta do edifício

2.3.3 Caracterização das opções construtivas

O edifício apresentado acima foi modelado recorrendo a duas soluções construtivas – LSF e convencional, sendo que os materiais utilizados na modulação das paredes exteriores, cobertura e paredes interiores são os únicos parâmetros que distinguem os modelos.

Foram considerados quatro níveis de isolamento ($U = [0,8; 0,4; 0,25; 0,1] W/(m^2.K)$), permitindo uma comparação mais completa das necessidades de climatização, generalizando ou particularizando as conclusões, caso a maior ou menor resistência térmica da envolvente: reduza, amplifique, mantenha constante ou inverta a diferença dos resultados entre os métodos construtivos.

Como referido anteriormente, houve a preocupação em definir os mesmos materiais de acabamento interior em ambos os modelos construtivos, uma vez que as propriedades termofísicas dos materiais em contacto com o ar climatizado têm uma importância relevante na forma como a transferência de calor convectiva e de massa (vapor de água) se processa, afetando as temperaturas e índice de humidade interior.

No entanto, também existiu (de forma quase transversal) o mesmo cuidado na definição dos materiais que constituem as superfícies exteriores da envolvente. Apesar da interação entre o ar exterior e o material superficial não implicar nenhuma alteração direta nas

condições interiores, a radiação solar e a forma como esta é absorvida e refletida pelo elemento, tem um papel importante na quantificação dos ganhos térmicos da envolvente.

A única superfície exterior da envolvente que distingue os dois modelos é o material utilizado no revestimento da cobertura, isto porque, não existindo nada mais convencional do que acabar um telhado típico com telha cerâmica, será muito pouco comum fazer o mesmo ao telhado de um edifício tipo LSF, ou a qualquer outro edifício de método construtivo leve. Assim, optou-se por escolher um revestimento metálico para acabar a cobertura da solução LSF. Sendo que a absorvidade solar da telha cerâmica é de 0,7 e a do rufo metálico de 0,4, ao usar-se o rufo metálico promove-se uma redução das necessidades de arrefecimento, aumentando as de aquecimento, consequência da maior reflexão de radiação solar que não se transforma em ganhos térmicos.

Os pavimentos, envidraçados, caixilharias, portas e dispositivos de sombreamento são definidos de igual forma nos dois modelos construtivos.

Nas opções construtivas apresentadas, não se considera qualquer efeito de ventilação dentro dos elementos, sendo os conjuntos apresentados compostos, na íntegra, por materiais sólidos.

Para completar a caracterização das opções construtivas, onde existe um conjunto de materiais de naturezas distintas que se conjugam para formar os elementos construtivos, surgem as grandezas Resistência Térmica (R'') (63) e Densidade Energética (D) (64) - propriedades compostas, resultantes de uma formulação onde entram propriedades térmicas e físicas simples: k , c_p , ρ , e .

$$R'' = \frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \sum \frac{e_j}{k_j} + \frac{1}{h_i} \quad [m^2 \cdot K/W], \quad [\text{eq. 5}]$$

Sendo h_e o coeficiente de convecção externo ($25W/(m^2 \cdot K)$); e_j e k_j , respetivamente, a espessura e condutividade térmica de cada de material que constitui o elemento construtivo; e h_i o coeficiente de convecção interno ($7,7W/(m^2 \cdot K)$ para elementos verticais (paredes) e $10W/(m^2 \cdot K)$ para elementos horizontais (cobertura)).

As resistências térmicas das soluções construtivas consideradas neste trabalho definem-se no seguinte intervalo: [1,25; 2,5; 4; 10] $m^2 \cdot K/W$.

A resistência térmica representa e mede a barreira que existe quando um gradiente térmico entre materiais provoca um fluxo de calor, sendo que, em regime estacionário – para um dado ΔT entre duas superfícies e considerando a condutividade térmica dos materiais como constante em função da temperatura – verifica-se a seguinte igualdade:

$$q'' = \frac{\Delta T}{R''} \quad [W/m^2] \quad (63) \quad [\text{eq. 6}]$$

Onde q'' é o fluxo de calor que atravessa o elemento por unidade de área.

A densidade energética quantifica a carga térmica que um dado volume de material consegue armazenar para uma determinada variação de temperatura.

Para o cálculo da densidade energética total do elemento construtivo, as parcelas correspondentes a cada material são multiplicadas pela respetiva espessura, e ao somatório das parcelas divide-se a espessura total do elemento.

$$D = \rho \cdot c_p = \frac{\sum \rho_j \cdot c_{p_j} \cdot e_j}{e_t} \quad [J/(m^3 \cdot K)] \quad [\text{eq. 7}]$$

Sendo ρ_j, c_{p_j}, e_j a densidade, calor específico e espessura de cada material que constitui o elemento; e e_t e espessura total do elemento.

Nas seguintes tabelas apresentam-se as soluções construtivas (paredes, cobertura e pavimento) do modelo LSF e convencional para os coeficientes de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,8 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$.

As soluções LSF e convencional para $U = [0,4; 0,25; 0,1] \text{ W}/(m^2 \cdot K)$, apenas variam na espessura de isolamento térmico, resultando em valores diferentes de resistência térmica e densidade energética. As tabelas relativas a estas soluções construtivas encontram-se no Anexo I.

LSF

Tabela 5 – Solução construtiva das paredes, pavimento e cobertura do edifício LSF para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$]	Densidade energética D [$\text{kJ}/(\text{m}^3.\text{K})$]
Paredes exteriores U0,8	Reboco	0,5	1000	1300	1,9	1,25	810,84
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	2,88		
	OSB	0,13	1700	650	1,5		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,3		
Cobertura U0,8	Rufo metálico	0,29	1000	1250	0,07	1,25	653,58
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,5		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	3,01		
	OSB	0,13	1700	650	1,5		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,3		
Pavimento U0,5	Soalho de madeira	0,14	1200	650	3	2,00	607,43
	Betão de regularização	0,41	840	1200	7		
	Betão celular	0,23	840	700	10		
	Espuma isolante	0,04	1400	10	5,27		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,3	-	424,90
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,3		

(O pavimento é um elemento construtivo que não varia na sua composição em qualquer modelo, por isso será excluído das restantes tabelas.)

Convencional

Tabela 6 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício convencional para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$]	Densidade energética D [$\text{kJ}/(\text{m}^3.\text{K})$]
Paredes exteriores U0,8	Reboco	0,5	1000	1300	1,9	1,25	1175,80
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	2,97		
	Alvenaria tijolo cerâmico	0,62	800	1700	15		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,3		
Cobertura U0,8	Telha cerâmica	1	800	2000	2,5	1,25	1897,10
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,5		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	3,34		
	Laje de betão armado	2,3	1000	2300	20		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,3		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,3	-	1384,43
	Alvenaria tijolo cerâmico	0,62	800	1700	10		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,3		

Os envidraçados são compostos por vidros duplos de 6 mm com caixa-de-ar de 13 mm ($U=2,665 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$) e caixilharias de alumínio com corte térmico ($U=4,719 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$). O controlo solar dos envidraçados é de média refletividade e transmissividade.

A porta exterior é construída em madeira de carvalho ($U=2,25 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$).

A permeabilidade do edifício às infiltrações de ar é classificada como média, havendo, aproximadamente, $0,14 \text{ RAH}$ que circulam pelas frestas.

2.3.4 Caracterização das condições operacionais: ocupação, equipamentos e sistemas

Ambas as soluções construtivas estão sujeitas a duas condições de cargas térmicas internas que pretendem simular o funcionamento de um edifício residencial e outro de comércio/serviços. Assim, as condições operacionais são diferentes nos dois casos, variando na densidade e período ocupacional; potência, regime, gamas e período de funcionamento de equipamentos consumidores de energia elétrica.

A modelação dos dois casos tentou ser a mais precisa e realista possível. O edifício “residencial” tem uma ocupação de 2-3 pessoas, uma potência de iluminação total de cerca

de 600W, computadores e televisões com uma potência global de 300W e um frigorífico de 80W.

O edifício de “serviços” simula um local de trabalho com uma ocupação de 10-15 pessoas, uma potência de iluminação total de cerca de 1250W, computadores e equipamento de escritório (e.g.: impressoras) com uma potência global de 3000W e um frigorífico de 80W. Os ganhos internos deste edifício são, aproximadamente, 5 vezes superiores aos do modelo “residencial”.

Ocupação

Considera-se que o edifício, para ambas as condições, está desocupado durante 23 dias do ano – feriado de ano novo, 7 dias em maio e 15 dias em agosto – e durante esse período nenhum equipamento ou sistema consumidor de energia funciona.

O edifício de cargas térmicas internas reduzidas tem uma densidade ocupacional de 0,03 *pessoas/m²* com uma taxa metabólica de 108 *W/pessoa*, sendo que o período e fração de ocupação se apresentam no Anexo II, na tabela AII.1 – para este e outros perfis definidos, a fração é multiplicada pela potência nominal do sistema, resultando na potência em uso ou a ser debitada num determinado período do dia.

O edifício de cargas térmicas internas relevantes tem uma densidade ocupacional de 0,15 *pessoas/m²* com uma taxa metabólica de 108 *W/pessoa*, sendo que o período e fração de ocupação se apresentam na tabela AII.2.

AVAC

Os modelos estão equipados com um sistema AVAC composto por um ventilador mecânico com recuperador de calor (efetividade de 70%) e *free cooling* (insufla um máximo de 15 RAH (renovações de ar por hora)) que cumpre as necessidades de ar novo mínimo (6,670 *l/(s.pessoa)* + 0,560 *l/(s.m²)*) e uma bomba de calor (unidade de expansão direta) que suprime as necessidades de climatização.

O ventilador mecânico apenas está desligado durante os 23 dias de férias para o caso do edifício “residencial”, juntando-se os fins-de-semana para o edifício de “serviços”.

A bomba de calor opera sempre que $T_{int} \leq 18^{\circ}\text{C}$ e $T_{int} \geq 25^{\circ}\text{C}$ ou $T_{int} \leq 15^{\circ}\text{C}$ e $T_{int} \geq 28^{\circ}\text{C}$ se o edifício estiver desocupado, designando-se o último intervalo por temperaturas *setback*.

A bomba de calor tem um COP de 1, tanto do lado do evaporador como do condensador, fazendo com que os consumos de climatização coincidam com as necessidades, eliminando um dado redundante na análise do comportamento térmico de um edifício.

Controlo solar

O controlo solar dos envidraçados (estores) opera durante a noite sempre que $T_{ext} \leq 18^{\circ}\text{C}$ (criando, obrigatoriamente – caso o edifício esteja ocupado - um gradiente térmico de dentro do edifício para fora) e durante o dia sempre exista uma carga térmica a eliminar ($T_{int} \geq 25^{\circ}\text{C}$ ou $T_{int} \geq 28^{\circ}\text{C}$, caso o edifício esteja desocupado).

Iluminação

O sistema de iluminação tem uma fração (da potência total de entrada das lâmpadas) radiante de 0,42 e visível de 0,18.

O modelo sujeito a cargas térmicas internas reduzidas tem 6 W/m^2 de iluminação geral e $1,5 \text{ W/m}^2$ de iluminação de secretária.

O modelo sujeito a cargas térmicas internas relevantes tem 15 W/m^2 de iluminação geral e de secretária.

Os perfis de utilização das luzes apresentam-se nas tabelas AII.3 a AII.5.

Equipamentos

Os equipamentos – computadores, impressoras e outro material de escritório, televisões, frigoríficos – têm uma fração (da potência total de entrada dos equipamentos) radiante de 0,2.

O edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas tem instalado 4 W/m^2 em computadores e televisões e 1 W/m^2 num frigorífico.

O edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes tem instalado 35 W/m^2 em computadores e equipamento de escritório e 1 W/m^2 num frigorífico.

Os perfis de utilização são apresentados nas tabelas AII.6 a AII.9.

Outros

Os modelos não possuem nenhum sistema de ventilação natural, controlo de humidade ou produção de águas quentes sanitárias.

2.3.5 Indicadores de desempenho térmico e energético

As necessidades de climatização anuais serão o principal indicador de desempenho térmico e energético dos edifícios em estudo.

Os resultados, refletirão, comparativamente, a eficácia térmica e eficiência energética das duas soluções construtivas quando sujeitas a cargas térmicas internas reduzidas e relevantes.

Considera-se este indicador suficiente para traçar conclusões quanto ao desempenho térmico dos edifícios, uma vez que o conforto térmico está assegurado pelo funcionamento do sistema de climatização sempre que a temperatura interior não está compreendida entre o intervalo de temperaturas definido (18°C e 25°C). E como a única diferença entre os modelos encontra-se na definição dos elementos construtivos, que se distinguem, essencialmente, na massa térmica que “transportam”, então os diferenciais entre necessidades de climatização estão diretamente relacionadas com a inércia térmica da solução construtiva.

A quantificação das necessidades de climatização é dada por N''_{tot} , valor obtido pela soma das necessidades de arrefecimento e de aquecimento divididas pela área útil de pavimento – conferindo representatividade aos resultados, que assim poderão ser comparados com edifícios com outra tipologia e geometria.

$$N''_{tot} = \frac{N_{arr} + N_{aq}}{A_u} \quad [kWh/m^2] \quad \text{[eq. 8]}$$

N_{arr} e N_{aq} (em kWh) são *outputs* da simulação dinâmica anual, e serão registados todos os valores referentes a cada solução construtiva, para os quatro níveis de isolamento térmico e para as duas condições de cargas térmicas internas.

A inércia térmica é a característica dos elementos construtivos que se pretende destacar, por isso o fator de atraso (φ) [eq. 1] e o fator de amortecimento (f) [eq. 2] são indicadores relevantes neste estudo^f.

O fator de amortecimento é sempre um bom indicador e quanto menor for esse valor menores são as flutuações da temperatura dentro do edifício, diminuindo os picos de carga

^f O fator de atraso e o fator de amortecimento foram medidos e calculados tendo por base modelos não coincidentes com os das simulações principais donde se retiram os resultados das necessidades de climatização. Estas propriedades dinâmicas são resultado da análise de simulações semanais de verão, onde se selecionou um dia quente a meio dessa semana para recolher os dados relativos às temperaturas exteriores e interiores. De modo a garantir que toda e qualquer variação de temperatura interior era resultado do calor que era conduzido pela envolvente, aos modelos simulados retiraram-se os envidraçados, sistemas de climatização, equipamentos, ocupação e infiltrações de ar; ainda se definiu um pavimento adiabático para que as variações incidam unicamente nos parâmetros variáveis de modelo para modelo – paredes exteriores e cobertura. As temperaturas interiores e exteriores do ar (e não das superfícies exteriores e interiores dos elementos construtivos), são usadas para calcular os diferenciais de temperatura necessários nas formulações.

térmica a eliminar. O dimensionamento do sistema de climatização resultará equipamentos menos potentes igualmente capazes de suprimir as necessidades.

O fator de atraso indica quantas horas a “onda de calor” (fig. 6) demora a atravessar o elemento construtivo da envolvente opaca. Um número elevado de horas não contribui necessariamente de forma positiva para uma redução das necessidades de climatização. O número ideal de horas é aquele em que: quando a superfície interior do elemento atinge a sua temperatura máxima, a temperatura exterior é a mínima registada durante o dia, maximizando a transferência de calor de dentro para fora, diminuindo as necessidades de arrefecimento. Esse valor ideal varia consoante a orientação do elemento construtivo e as condições climatéricas (radiação solar) do local de implantação. Pode suceder o fator de atraso ser tão elevado que no momento em que a carga térmica chega à superfície interior, já o elemento está a ser sujeito a ganhos solares do dia seguinte, limitando a perda de calor por condução que seria benéfica.

Tabela 7 – Fator de atraso e fator de amortecimento do edifício LSF para cada nível de isolamento

	Fator de atraso φ [h]	Fator de amortecimento f
LSF U0,8	4	0,26
LSF U0,4	6	0,13
LSF U0,25	7	0,078
LSF U0,1	16	0,031

Previsivelmente, as propriedades dinâmicas do edifício convencional são favoráveis para qualquer nível de isolamento, sendo o fator de atraso mais elevado e o fator de amortecimento mais reduzido, o que significa que a carga térmica absorvida pela envolvente chegará mais tardiamente à superfície interior dos elementos e que as flutuações da temperatura interior são mais reduzidas. Estes dois fatores antevêm um melhor comportamento térmico do edifício convencional, resultado da sua maior inércia.

Tabela 8 – Fator de atraso e fator de amortecimento do edifício convencional para cada nível de isolamento

	Fator de atraso φ [h]	Fator de amortecimento f
Convencional U0,8	8	0,041
Convencional U0,4	14	0,032
Convencional U0,25	17	0,029
Convencional U0,1	17	0,017

2.4 Análise crítica de resultados

2.4.1 Edifícios com cargas térmicas internas reduzidas - LSF Vs. Convencional

Nas tabelas 9 e 10 surgem as necessidades de climatização anuais do edifício LSF e convencional para cada valor de resistência térmica da envolvente exterior, quando sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas.

Tabela 9 - Necessidades de climatização do edifício LSF sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica

R'' [$m^2 \cdot K/W$]	N''_{arr} [kWh/m^2]	N''_{aq} [kWh/m^2]	N''_{tot} [kWh/m^2]
1,25	10,42	26,97	37,39
2,5	7,23	10,46	17,69
4	6,13	5,50	11,63
10	4,94	1,85	6,79

Tabela 10 - Necessidades de climatização do edifício convencional sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica

R'' [$m^2 \cdot K/W$]	N''_{arr} [kWh/m^2]	N''_{aq} [kWh/m^2]	N''_{tot} [kWh/m^2]
1,25	7,82	14,80	22,62
2,5	5,52	4,36	9,88
4	4,58	1,66	6,24
10	3,54	0,21	3,75

Na figura 12 as necessidades de climatização do edifício LSF e convencional são agrupadas para cada valor comum de resistência térmica.

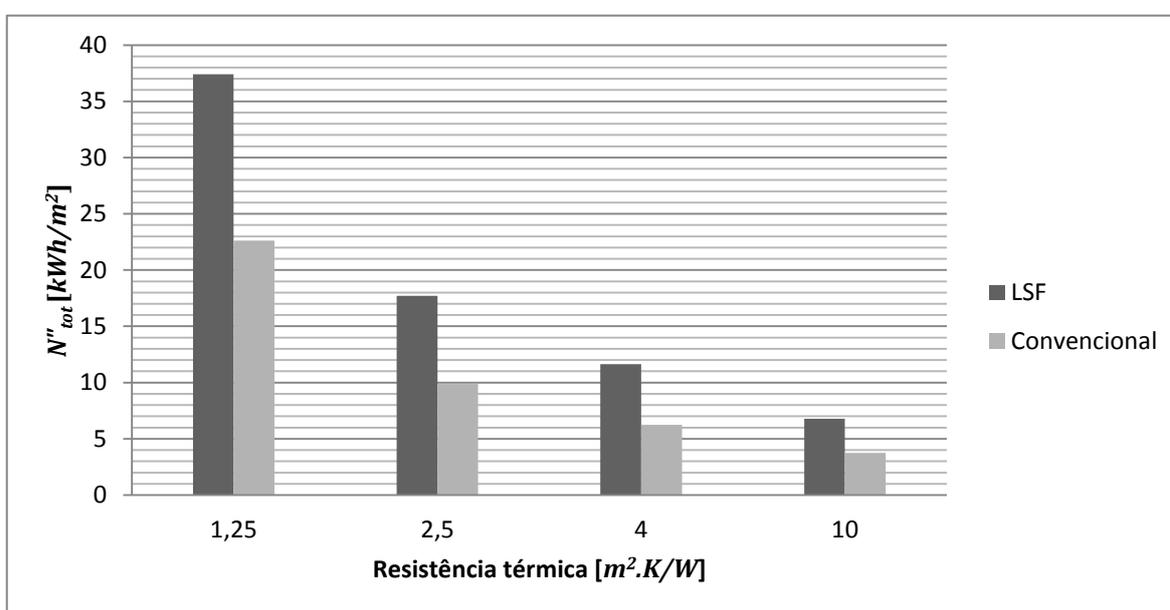


Figura 12 - Representação gráfica das necessidades de climatização de ambos os edifícios sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas

Para qualquer resistência térmica da envolvente exterior considerada, os resultados são demonstrativos do superior desempenho térmico do edifício convencional, tendo necessidades de climatização mais reduzidas.

Seria de esperar que as necessidades de arrefecimento fossem as mais “lesadas” pela falta de inércia térmica no edifício LSF, no entanto tal não se verifica.

O edifício LSF mantém as necessidades de arrefecimento na casa dos 30% mais elevadas para qualquer resistência térmica, enquanto as necessidades de aquecimento decrescem a um ritmo inferior àquele verificado no edifício convencional, resultando numa diferença percentual que aumenta à medida que se acrescenta isolamento.

Tabela 11 - Diferença percentual entre as necessidades de climatização do edifício LSF e convencional para cada valor de resistência térmica quando sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas

R'' [m ² .K/W]	% <i>arr</i> LSF Vs convencional	% <i>aq</i> LSF Vs convencional	% <i>tot</i> LSF Vs convencional
1,25	33,26	82,21	65,28
2,5	31,03	139,98	79,08
4	33,91	231,96	86,54
10	39,74	773,01	81,13

A cobertura mais refletante aplicada no edifício LSF tem um contributo para estes resultados, no entanto não explica a escalada da % *aq* LSF Vs convencional com o aumento da resistência térmica.

O edifício LSF tem necessidades de climatização entre 65% e 86% superiores em relação ao edifício convencional, demonstrando uma inferioridade considerável quando o único critério é o do comportamento térmico.

Reconhece-se a importância de criar estratégias que aumentem a inércia térmica de edifícios leves, otimizando a sua eficácia térmica.

2.4.2 Edifícios com cargas térmicas internas relevantes - LSF Vs. Convencional

Nas tabelas 12 e 13 surgem as necessidades de climatização anuais do edifício LSF e convencional para cada valor de resistência térmica da envolvente exterior, quando sujeitos a cargas térmicas internas relevantes.

Tabela 12 - Necessidades de climatização do edifício LSF sujeito a cargas térmicas internas relevantes para cada valor de resistência térmica

R'' [m ² .K/W]	N''_{arr} [kWh/m ²]	N''_{aq} [kWh/m ²]	N''_{tot} [kWh/m ²]
1,25	32,10	14,49	46,59
2,5	28,42	6,01	34,43
4	27,27	3,25	30,53
10	26,12	1,11	27,22

Tabela 13 - Necessidades de climatização do edifício convencional sujeito a cargas térmicas internas relevantes para cada valor de resistência térmica

R'' [$m^2 \cdot K/W$]	N''_{arr} [kWh/m^2]	N''_{aq} [kWh/m^2]	N''_{tot} [kWh/m^2]
1,25	27,44	4,39	31,83
2,5	25,20	0,67	25,87
4	24,27	0,12	24,39
10	23,27	0,00	23,27

Na figura 13 as necessidades de climatização do edifício LSF e convencional são agrupadas para cada valor comum de resistência térmica.

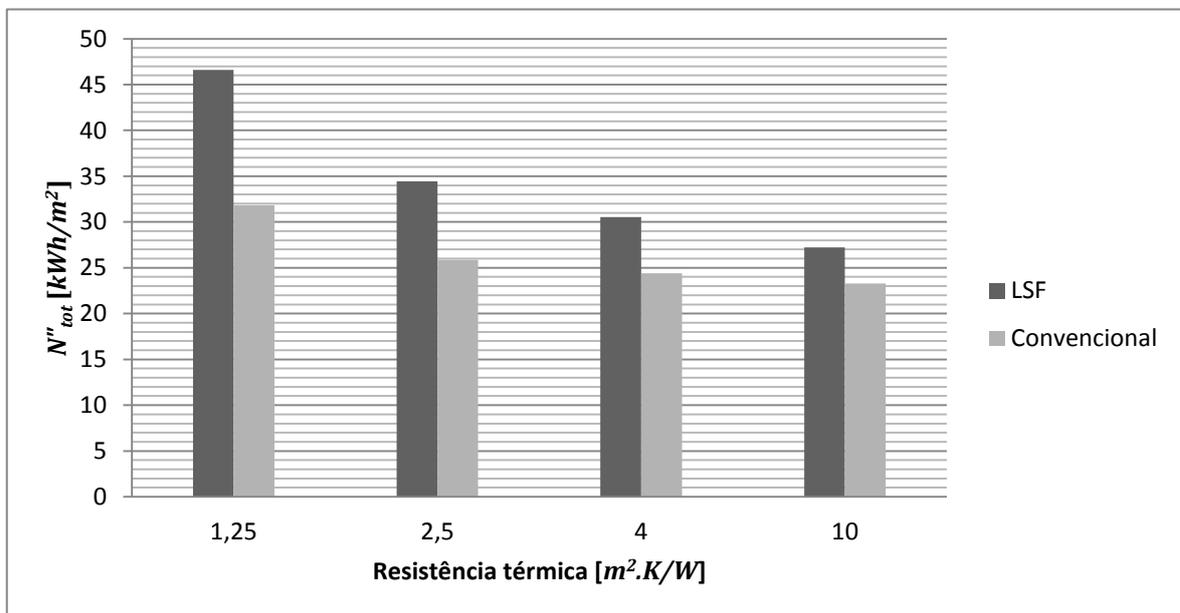


Figura 13 - Representação gráfica das necessidades de climatização de ambos os edifícios sujeitos a cargas térmicas internas relevantes

Sob condições de cargas térmicas internas relevantes, o aumento da resistência térmica da envolvente exterior não tem o mesmo impacto na redução das necessidades de climatização, isto porque existe uma grande fonte de calor gerado no interior do espaço climatizado e uma parte significativa das necessidades de arrefecimento são devido a esses ganhos internos. Uma forte resistência térmica não resulta positivamente na dissipação desses ganhos, antes pelo contrário, “aprisionando” o calor dentro do edifício que poderia ser transferido para o exterior caso a envolvente fosse menos bem isolada. No entanto, devido à intensa radiação solar e elevadas temperaturas do verão alentejano, continua a ser benéfico aumentar a espessura da camada de isolamento na envolvente, e assim, o calor que deixa de entrar (proveniente de fontes exteriores) seja superior àquela que deixa de sair (proveniente de fontes internas).

Tabela 14 - Diferença percentual entre as necessidades de climatização do edifício LSF e convencional para cada valor de resistência térmica quando sujeitos a cargas térmicas internas relevantes

R'' [m ² .K/W]	% <i>arr</i> LSF Vs convencional	% <i>aq</i> LSF Vs convencional	% <i>tot</i> LSF Vs convencional
1,25	16,99	230,12	46,37
2,5	12,79	792,91	33,09
4	12,39	2562,03	25,17
10	12,23	-	16,98

O edifício convencional continua a ter um comportamento térmico superior ao edifício LSF, no entanto seria de esperar que a inércia térmica amplificasse as diferenças entre os dois modelos quando sujeitos a cargas térmicas internas relevantes. Tal não se verifica, e o edifício LSF tem necessidades de climatização entre 17% e 46% superiores ao edifício convencional, registando o facto das diferenças se irem tornando mais ténues com o aumento de isolamento. Esta observação não era previsível, uma vez que o isolamento térmico é mais eficaz na redução das necessidades de aquecimento, e neste caso, estas têm um papel pouco significativo no balanço total do comportamento térmico - à medida que se aumenta o isolamento, o edifício LSF tem um aumento de eficiência térmica superior ao edifício convencional.

Assim, e de forma algo surpreendente, sob condições de fortes cargas térmicas, numa situação em que os ganhos internos devem ser dissipados e/ou armazenados, a fraca inércia térmica não se revela uma desvantagem tão grande quanto esperado, e tende a ser menos desvantajosa com o aumento da resistência térmica da envolvente.

Prevê-se que estratégias de melhoria do comportamento térmico pelo aumento da inércia, aplicadas ao edifício LSF, tenham resultados mais positivos no caso do modelo sujeito a cargas térmicas internas relevantes, existindo um diferencial mais curto, entre o edifício LSF e convencional, a minimizar.

2.5 Síntese do capítulo

Este capítulo teve como principal objetivo a comparação do comportamento térmico entre dois modelos simulados dinamicamente, quando sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas e relevantes. Os dois modelos – edifício LSF e convencional – distinguem-se pelas soluções construtivas adotadas, apresentando, respetivamente, fraca e forte inércia térmica. Pretendeu-se, assim, concluir quanto à importância da inércia no comportamento térmico do edifício, quantificado pelas necessidades de climatização anuais.

Em primeiro lugar, foram apresentadas soluções construtivas típicas, sendo dado um destaque aos métodos LSF e Convencional. Estes foram caracterizados detalhadamente, juntamente com todos os parâmetros definidos na modelação dos edifícios no *DesignBuilder*.

Por último, apresentaram-se os indicadores de desempenho térmico e energético e foi efetuada a análise comparativa entre os edifícios, com recurso a esses mesmos indicadores, concluindo que o edifício LSF, para qualquer resistência térmica da envolvente, e em ambas as condições de cargas térmicas internas, se demonstra inferior termicamente. A fraca inércia térmica prejudica, principalmente, o comportamento térmico do edifício quando este é sujeito a cargas térmicas internas reduzidas, sendo as necessidades de aquecimento aquelas que mais distinguem as duas soluções construtivas – LSF e convencional.

O edifício LSF tem necessidades entre 65% e 86% superiores ao edifício convencional sob condições de cargas térmicas internas reduzidas e entre 17% e 46% quando sujeitos a cargas térmicas internas relevantes.

3 Inércia e Resistência Térmica no Estudo e Otimização do Comportamento Térmico de Edifícios

3.1 Sumário

Capítulo onde será estudado a fundo o benefício da inércia térmica no comportamento térmico de um edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas e relevantes para diferentes níveis de isolamento. Será, ainda aplicada uma estratégia de otimização térmica ao edifício LSF, pelo aumento da inércia.

Dividindo o capítulo em duas partes (subcapítulos 3.3 e 3.4), na primeira será realizada uma experiência com modelos construtivos simplificados, que consiste em adicionar massa térmica, individualmente, em diferentes elementos construtivos – paredes exteriores, cobertura e paredes interiores – para concluir, recorrendo a indicadores térmicos e energéticos, onde é mais benéfico fazer essa adição.

Na segunda parte do trabalho, regressa-se aos modelos construtivos apresentados no segundo capítulo, e serão aplicados os conhecimentos adquiridos na experiência realizada, apresentando-se uma estratégia de melhoria a nível da inércia térmica a aplicar ao edifício LSF.

Será efetuada uma análise comparativa e crítica dos resultados obtidos nas simulações dinâmicas efetuadas aos modelos de diferentes soluções construtivas.

3.2 Metodologia de análise

A experiência da adição de massa térmica realiza-se com modelos construtivos simplificados, sendo a envolvente exterior composta apenas por uma camada de isolamento na superfície exterior e uma camada de massa térmica na superfície interior, e as paredes interiores compostas apenas pelo material de massa térmica. O pavimento terá a mesma solução daquela apresentada no capítulo 2, não sendo um elemento de estudo nesta análise. Existem três níveis de massa térmica (leve, média, pesada), três espessuras definidas na caracterização de cada elemento construtivo - 1cm, 10cm, 40cm. Para um determinado coeficiente de transmissão térmica - $U = [0,8; 0,4; 0,25; 0,1] W/(m^2.K)$ -, será ajustada a espessura de isolamento dependendo do nível da massa térmica.

Os modelos são simulados para quatro níveis de isolamento térmico e duas condições de cargas térmicas internas, sendo os valores, parâmetros definidos e pressupostos considerados quanto à implantação e dados climáticos, caracterização geométrica e dimensional e condições operacionais exatamente iguais exatamente iguais àqueles presentes na caracterização do caso de referência do capítulo 2.

O material de massa térmica considerado trata-se de um betão genérico, que varia na sua espessura para cada solução construtiva mais leve ou mais pesada. A caracterização da

espessura e massa do betão como material de massa térmica é feita em unidades normalizadas de espessura equivalente de betão (*eeb*) – indicada em centímetros equivalentes de betão [*cmeb*] - e massa equivalente de betão (*meb*) – indicada em quilogramas equivalentes de [*kg**e**b*]. Esta normalização permite aplicar materiais diferentes nos elementos construtivos e a quantidade dos mesmos ser facilmente convertida e calculada, tornando os resultados extrapoláveis para variadas realidades construtivas.

A massa térmica difere da massa, uma vez que a primeira considera as propriedades termofísicas que influenciam a qualidade do material como unidade de armazenamento térmico – densidade e calor específico.

Considerando dois corpos constituídos de materiais diferentes – corpo *b* em betão e corpo *i* de material genérico - com uma determinada massa, e quer-se garantir que ambos têm a mesma capacidade de armazenar energia calorífica, em *J/°C*, então a massa de betão necessária para garantir a mesma absorção de carga térmica conseguida pelo outro corpo, para uma determinada variação de temperatura, é dada pela seguinte igualdade:

$$m_{eb} \cdot c_{p_b} = m_i \cdot c_{p_i} \Leftrightarrow m_{eb} = \frac{c_{p_i}}{c_{p_b}} \cdot m_i \quad [kg**e**b] \quad [\text{eq. 9}]$$

Analogamente, faz-se o mesmo raciocínio para a espessura de material necessário que garante a mesma capacidade de absorção calorífica, dada uma variação de temperatura e para uma área superficial idêntica dos dois corpos:

$$e_{eb} \cdot \rho_b \cdot c_{p_b} = e_i \cdot \rho_i \cdot c_{p_i} \Leftrightarrow (e_{eb} \cdot \rho_b \cdot A_b) \cdot c_{p_e} = (e_i \cdot \rho_i \cdot A_i) \cdot c_{p_i} \quad [\text{eq. 10}]$$

$$\text{para } A_b = A_i,$$

$$e_{eb} \cdot \rho_b \cdot c_{p_b} = e_i \cdot \rho_i \cdot c_{p_i} \Leftrightarrow e_{eb} = \frac{\rho_i \cdot c_{p_i}}{\rho_b \cdot c_{p_b}} \cdot e_i \quad [c**m**e**b**]$$

A adição, localizada, de massa térmica tem como base a solução construtiva mais leve possível, dados os elementos criados, e para cada elemento em análise existem três conjuntos de resultados. Ficam de fora do estudo um elevado número de combinações construtivas (18) possíveis, sendo possível combinar um total de 27 soluções (3x3x3) considerando cada parede exterior, cobertura e parede interior nas suas constituições leves, médias e pesadas. As 9 soluções construtivas consideradas consistem na combinação de paredes exteriores leves, médias e pesadas com a cobertura e paredes interiores leves; cobertura média e pesada com paredes exteriores e paredes interiores leves; paredes interiores médias e pesadas com paredes exteriores e cobertura leve; paredes exteriores e cobertura médias e pesadas com paredes interiores leves.

Estas últimas combinações em que é adicionada massa térmica não de forma individual, mas em simultâneo nas paredes exteriores e cobertura, foi estudada por uma questão prática e de aproximação com a realidade. Esta combinação é algo mais aproximada de soluções construtivas existentes, tendo em conta que num edifício real é muito pouco provável que as paredes exteriores tenham média/forte inércia térmica enquanto a cobertura tenha fraca inércia, e vice-versa. No entanto não existe nenhum constrangimento em construir paredes interiores leves/pesadas num edifício cuja envolvente seja pesada/leve.

As seguintes figuras representam graficamente as combinações descritas, sendo que a cor verde caracteriza o elemento leve (1 *cm*), o amarelo o elemento médio (10 *cm*) e o vermelho o elemento pesado (40 *cm*). O primeiro retângulo é referente às paredes exteriores, o segundo à cobertura e o terceiro às paredes interiores.



Figura 14 - Combinações dos elementos construtivos com diferentes massas

Apesar dos intervalos de massa térmica serem algo elevados, sendo que o ideal seria definir elementos construtivos que variassem na sua espessura de forma mais gradual, considera-se suficiente a abordagem tomada, não comprometendo aquilo que se pode concluir quanto ao impacto da variação de massa térmica num dado elemento construtivo.

Na análise crítica de resultados, para as duas condições de cargas térmicas internas, são apresentadas as necessidades de climatização anuais em função da massa térmica do edifício para cada elemento construtivo em estudo, concluindo quanto ao benefício da adição de massa térmica e ao potencial de poupança energética para as várias situações estudadas.

Na segunda parte do capítulo, seleciona-se um material de massa térmica a incluir no edifício LSF, cujo único critério de escolha é estritamente térmico quanto à capacidade que o material tem em absorver calor. Esse material será incorporado no(s) elemento(s) onde experiência anterior ditar como sendo mais eficaz e com essa nova solução melhorada desenrola-se o processo comparativo e crítico entre os resultados – necessidades de climatização para cada nível de isolamento e cargas térmicas internas - das outras soluções construtivas já apresentadas.

3.3 Potencial de poupança energética pelo aumento de massa térmica em diferentes elementos construtivos

3.3.1 Caracterização de caso de referência

3.3.1.1 Caracterização das opções construtivas

Os pavimentos, envidraçados, caixilharias, portas e dispositivos de sombreamento não variam das soluções adotadas no capítulo anterior, sendo mantido todo e qualquer parâmetro definido fora do separador *Construction* do *DesignBuilder*.

Nas opções construtivas apresentadas, não se considera qualquer efeito de ventilação dentro dos elementos, sendo os conjuntos apresentados compostos, na íntegra, por materiais sólidos. As soluções variam na espessura de isolamento e massa térmica.

Nas tabelas seguintes apresentam-se as opções construtivas deste modelo simplificado, onde se destaca a coluna Classe que se refere à categorização do elemento construtivo quanto à sua inércia térmica.

Tabela 15 - Solução construtiva das paredes exteriores, cobertura e paredes interiores do edifício simplificado para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de 0,8 W/(m².K)

	Classe	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [m².K/W]	Densidade energética D [kJ/(m³.K)]
Paredes exteriores U0,8	Fracá	Lã de rocha	0,038	840	40	4,07	1,25	421,45
		Betão	1,13	1000	2000	1,00		
	Média	Lã de rocha	0,038	840	40	3,77		1461,63
		Betão	1,13	1000	2000	10,00		
	Pesada	Lã de rocha	0,038	840	40	2,76		1873,08
		Betão	1,13	1000	2000	40,00		
Cobertura U0,8	Fracá	Lã de rocha	0,038	840	40	4,18	1,25	413,21
		Betão	1,13	1000	2000	1,00		
	Média	Lã de rocha	0,038	840	40	3,88		1450,31
		Betão	1,13	1000	2000	10,00		
	Pesada	Lã de rocha	0,038	840	40	2,87		1868,36
		Betão	1,13	1000	2000	40,00		
Paredes interiores	Fracá	Betão	1,13	1000	2000	1,00	-	2000,00
	Média	Betão	1,13	1000	2000	10,00	-	2000,00
	Alta	Betão	1,13	1000	2000	40,00	-	2000,00

Tabela 16 - Solução construtiva das paredes exteriores, cobertura e paredes interiores do edifício simplificado para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de 0,4 W/(m².K)

	Classe	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [m².K/W]	Densidade energética D [kJ/(m³.K)]
Paredes exteriores U0,4	Fracá	Lã de rocha	0,038	840	40	8,82	2,5	233,84
		Betão	1,13	1000	2000	1,00		
	Média	Lã de rocha	0,038	840	40	8,52		1095,37
		Betão	1,13	1000	2000	10,00		
	Pesada	Lã de rocha	0,038	840	40	7,51		1689,17
		Betão	1,13	1000	2000	40,00		
Cobertura U0,4	Fracá	Lã de rocha	0,038	840	40	8,93	2,5	231,63
		Betão	1,13	1000	2000	1,00		
	Média	Lã de rocha	0,038	840	40	8,63		1089,10
		Betão	1,13	1000	2000	10,00		
	Pesada	Lã de rocha	0,038	840	40	7,62		1685,34
		Betão	1,13	1000	2000	40,00		
Paredes interiores	Fracá	Betão	1,13	1000	2000	1,00	-	2000,00
	Média	Betão	1,13	1000	2000	10,00		2000,00
	Alta	Betão	1,13	1000	2000	40,00		2000,00

Tabela 17 - Solução construtiva das paredes exteriores, cobertura e paredes interiores do edifício simplificado para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de 0,25 W/(m².K)

	Classe	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [m².K/W]	Densidade energética D [kJ/(m³.K)]
Paredes exteriores U0,25	Fracá	Lã de rocha	0,038	840	40	14,52	4	160,30
		Betão	1,13	1000	2000	1,00		
	Média	Lã de rocha	0,038	840	40	14,22		845,49
		Betão	1,13	1000	2000	10,00		
	Pesada	Lã de rocha	0,038	840	40	13,21		1511,82
		Betão	1,13	1000	2000	40,00		
Cobertura U0,25	Fracá	Lã de rocha	0,038	840	40	14,63	4	159,41
		Betão	1,13	1000	2000	1,00		
	Média	Lã de rocha	0,038	840	40	14,33		841,82
		Betão	1,13	1000	2000	10,00		
	Pesada	Lã de rocha	0,038	840	40	13,32		1508,77
		Betão	1,13	1000	2000	40,00		
Paredes interiores	Fracá	Betão	1,13	1000	2000	1,00	-	2000,00
	Média	Betão	1,13	1000	2000	10,00	-	2000,00
	Alta	Betão	1,13	1000	2000	40,00	-	2000,00

Tabela 18 - Solução construtiva das paredes exteriores, cobertura e paredes interiores do edifício simplificado para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de 0,1 W/(m².K)

	Classe	Material	<i>k</i>	<i>c_p</i>	<i>ρ</i>	<i>e</i>	Resistência térmica <i>R''</i> [m ² .K/W]	Densidade energética <i>D</i> [kJ/(m ³ .K)]
Paredes exteriores U0,1	Fracá	Lã de rocha	0,038	840	40	37,32	10	84,92
		Betão	1,13	1000	2000	1,00		
	Média	Lã de rocha	0,038	840	40	37,02		451,81
		Betão	1,13	1000	2000	10,00		
	Pesada	Lã de rocha	0,038	840	40	36,01		1068,41
		Betão	1,13	1000	2000	40,00		
Cobertura U0,1	Fracá	Lã de rocha	0,038	840	40	37,43	10	84,77
		Betão	1,13	1000	2000	1,00		
	Média	Lã de rocha	0,038	840	40	37,13		450,83
		Betão	1,13	1000	2000	10,00		
	Pesada	Lã de rocha	0,038	840	40	36,12		1066,92
		Betão	1,13	1000	2000	40,00		
Paredes interiores	Fracá	Betão	1,13	1000	2000	1,00	-	2000,00
	Média	Betão	1,13	1000	2000	10,00	-	2000,00
	Alta	Betão	1,13	1000	2000	40,00	-	2000,00

Calculando a massa útil de betão pela equação 4, designando-a por massa térmica, convencionando que 1 cm de betão corresponde a 1 *cmeb* e que 1 kg de betão coincide com 1 *kgeb*:

Tabela 19 - Massa térmica de todas as soluções construtivas em estudo

<i>e</i> [<i>cmeb</i>]	Massa térmica [<i>kgeb/m</i> ²]			
	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	59,66 ^g	59,66	59,66	59,66
10	276,10 ^h	258,75 ⁱ	181,11 ^j	475,18 ^k
40	997,54 ^l	922,36 ^m	585,93 ⁿ	1860,24 ^o

^g Solução construtiva representada graficamente na Fig. 14 (primeira combinação)

^h Solução construtiva representada graficamente na Fig. 14 (segunda combinação)

ⁱ Solução construtiva representada graficamente na Fig. 14 (terceira combinação)

^j Solução construtiva representada graficamente na Fig. 17 (quarta combinação)

^k Solução construtiva representada graficamente na Fig. 18 (quinta combinação)

^l Solução construtiva representada graficamente na Fig. 19 (sexta combinação)

^m Solução construtiva representada graficamente na Fig. 20 (sétima combinação)

ⁿ Solução construtiva representada graficamente na Fig. 21 (oitava combinação)

^o Solução construtiva representada graficamente na Fig. 22 (nona combinação)

3.3.1.2 Indicadores de desempenho térmico e energético

Nesta experiência em curso, o objetivo é determinar qual o elemento construtivo onde é mais benéfico haver ou adicionar massa térmica. Para tal, as necessidades de climatização anuais das 9 soluções construtivas, para cada nível de isolamento térmico e condição de cargas térmicas internas, serão agrupadas em relação a cada elemento construtivo em análise e estudada a sua evolução com o aumento de massa térmica.

As necessidades de climatização por unidade de área útil de pavimento [kWh/m^2], em função da massa térmica [kg/m^2], são o indicador primário que permite concluir quanto ao desempenho térmico e energético destes modelos.

Apesar de este indicador mostrar claramente o benefício da inércia nas construções, derivando a função que descreve a tendência evolutiva das necessidades em função da massa térmica, consegue-se um indicador denominado por “potencial de poupança pela inércia” (Ppi) que quantifica a carga térmica que deixa de ser necessária dissipar e adicionar ao espaço climatizado no período de um ano, por cada quilograma de massa que é adicionado num elemento construtivo.

$$Ppi = \frac{dN''_{tot}}{dm''_{eb}} \cdot 1000 \quad [Wh/kg_{eb}] \quad [eq. 11]$$

Existindo apenas três valores de N''_{tot} para cada elemento construtivo, a margem de erro para definir uma função que una esses três pontos é considerável, assim, admite-se para obter valores mais precisos de Ppi ter-se-ia de realizar a experiência com um maior número de espessuras intermédias de massa térmica, em vez do único elemento com 1 cm_{eb} .

3.3.2 Análise crítica de resultados

3.3.2.1 Edifício com cargas térmicas internas reduzidas

Através do estudo do edifício sujeito a cargas internas reduzidas e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 W/(m^2 \cdot K)$, apresentam-se as tabelas e figuras relevantes à análise crítica do desempenho térmico do modelo.

O aumento de espessura de massa térmica resulta em menores necessidades de climatização quando aplicado às paredes interiores, como se pode verificar na tabela 20.

Poderia argumentar-se que tal era previsível, considerando que as paredes interiores têm, aproximadamente, o “dobro” da área útil dos elementos da envolvente exterior, uma vez que ambas as superfícies estão em contacto com o espaço climatizado. No entanto esse “dobro” não é científico, e não se pode afirmar que na envolvente exterior metade da

massa do elemento não é útil para armazenar carga térmica apenas porque existe uma única superfície virada para dentro.

Tabela 20 – Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de 0,8 W/(m².K)

$N''_{tot} [kWh/m^2] U0,8$				
$e [cmeb]$	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	37,37	37,37	37,37	37,37
10	29,99	28,98	24,12	24,93
40	27,49	25,93	18,58	20,67

E se é verdade que quanto mais exterior for um ponto arbitrário de massa térmica, mais longe este estiver do espaço climatizado, menor será a sua interação e contributo no controlo da temperatura interior, também é verdade que quanto mais bem isolada for a envolvente menos o primeiro efeito é real. Havendo uma grande resistência térmica entre o ponto de massa térmica arbitrário, menor será o fluxo de calor que parte desse ponto por condução em direção ao exterior – e mais à frente provar-se-á que o benefício da massa térmica nas paredes interiores verificado para este edifício fracamente isolado, não é razão dessa baixa resistência térmica e que mesmo para envolventes fortemente isoladas verifica-se o mesmo benefício.

Portanto, o conceito da massa térmica interior valer o “dobro” da massa dos elementos da envolvente exterior, pode conferir, apenas, a ideia empírica da maior eficácia da massa térmica nas paredes interiores.

Apesar destas questões serem relevantes, pode-se fazer uma análise totalmente desprezada destes conceitos, porque a abordagem à adição de massa térmica é igual para qualquer elemento construtivo e os resultados das simulações trarão as conclusões devidas.

Repare-se que a variável em causa é a espessura do elemento, portanto a massa térmica que é efetivamente adicionada está dependente da área útil do elemento considerado. É interessante notar que apesar das paredes exteriores terem uma área de 100 m² e a cobertura uma área de 91 m², são paredes interiores, com apenas 56 m², que garantem menores necessidades de climatização quando se adicionam $x\ cmeb$ a qualquer um dos elementos construtivos. Aumentar $x\ cmeb$ nas paredes interiores representa menos 44%, 39% e 71% de massa em relação, respetivamente, ao mesmo aumento de espessura nas paredes exteriores, cobertura e em simultâneo nas duas anteriores.

Nesta análise, as necessidades de climatização não estão desagregadas em necessidades de aquecimento e arrefecimento, evitando o processamento de uma quantidade de dados que tornaria esta abordagem demasiado densa e pouco concisa. No entanto, e porque no capítulo anterior ficou a pairar a dúvida sobre qual a estação onde a inércia térmica se

revela mais benéfica, recordando que o edifício LSF foi definido com uma cobertura mais refletante do que o edifício convencional impedindo uma comparação de resultados estritamente em função da inércia, procedeu-se a uma pequena análise de modo a concluir qual a estação em que a inércia térmica é mais benéfica.

Pode existir a noção que uma inércia térmica forte leva a um aumento das necessidades aquecimento, uma vez que o calor que está a ser gerado no interior do edifício, calor útil neste caso, irá ser absorvido pelos elementos, obrigando a um eventual aumento de consumo energético de aquecimento para compensar essa absorção. Mais, que o aproveitamento de ganhos solares pode ser dificultado por uma inércia demasiado elevada, uma vez que é necessário que exista um gradiente térmico entre a temperatura ambiente e a temperatura do corpo que recebeu a radiação para haver transferência de calor por convecção para o ambiente. Se o calor específico (e condutividade térmica, para que não se considere relevante o gradiente dentro do próprio sólido) do elemento sujeito à irradiação for muito elevado, a temperatura do sólido pode não aumentar de forma significativa, comprometendo a transferência térmica para o ar interior e o conseqüente aumento da temperatura ambiente.

Para testar esta hipótese, realizaram-se simulações fazendo variar a massa e resistência térmica dos elementos construtivos, e os resultados indicaram o oposto àquilo que era expectável desde que o edifício não seja mal isolado. À medida que se aumenta a resistência térmica da envolvente exterior, o ganho percentual nas necessidades de climatização com o aumento de massa térmica – em qualquer elemento construtivo – torna-se maior nas necessidades de aquecimento. Ou seja, a partir de um isolamento médio para cima ($U \geq 0,4 W/(m^2.K)$) as necessidades de aquecimento diminuem a uma taxa superior às necessidades de arrefecimento dado um determinado aumento de massa térmica.

Portanto, o benefício da inércia térmica na estação de aquecimento no controlo e manutenção das condições de conforto, pelo armazenamento e aproveitamento de ganhos internos/solares, compensa largamente qualquer prejuízo que possa existir na forte inércia térmica de um edifício quanto às necessidades de aquecimento.

Na figura 23 representam-se graficamente as necessidades de climatização em função da massa térmica, calculada na tabela 19, com as respetivas curvas de tendência traçadas e barras de erro (5%) associadas.

As funções que aproximam a tendência evolutiva das necessidades de climatização em relação à massa térmica são bastante razoáveis, - e tenderão a ser ainda melhores aproximações com o aumento da resistência térmica da envolvente – uma vez que os pontos reais (simulados) das necessidades quase sempre se encontram a uma diferença inferior a $\pm 5\%$ do ponto dado pela função aproximada para a mesma abcissa.

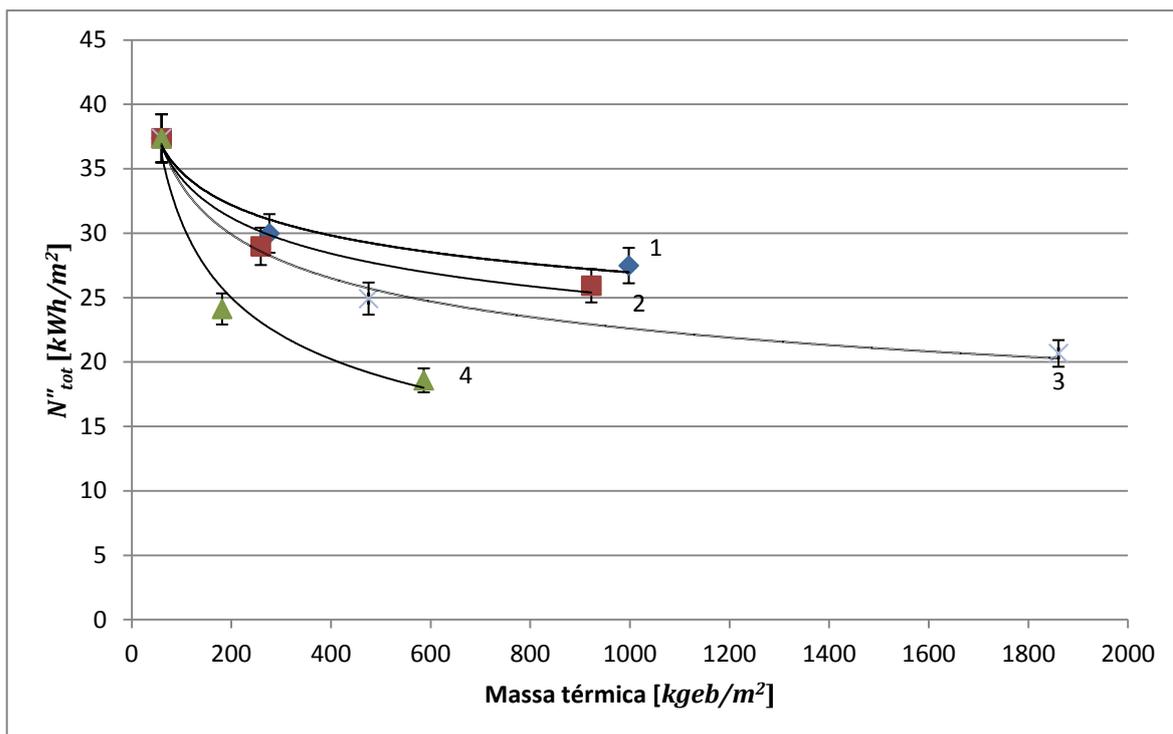


Figura 15 – Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos

1: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes exteriores.

- Equação: $y = 57,69x^{-0,11}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9625$

2: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada na cobertura.

- Equação: $y = 63,62x^{-0,135}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9677$

3: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada simultaneamente nas paredes exteriores e cobertura.

- Equação: $y = 75,19x^{-0,174}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9918$

4: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes interiores.

- Equação: $y = 125,77x^{-0,305}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9743$

Derivando cada uma das equações acima, obtêm-se as funções (para cada elemento construtivo) que descrevem e quantificam a poupança de energia de climatização por quilograma de massa térmica adicionada; ou Ppi .

Substituindo a variável pelo valor da massa térmica que caracteriza a solução leve, média e pesada de cada elemento construtivo, e agrupando os resultados na seguinte tabela, conclui-se quanto à poupança expectável ao adicionar-se massa térmica nos diferentes elementos para cada nível de inércia.

Tabela 21 – Ppi 's do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 W/(m^2.K)$

$Ppi [Wh/kg_{eb}] U_{0,8}$				
$e [cm_{eb}]$	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	67,88	82,90	184,75	107,63
10	12,39	15,68	43,38	9,42
40	2,98	3,71	9,37	1,90

Observa-se que o Ppi é superior nas paredes internas para qualquer nível de massa térmica. Na tabela abaixo encontram-se as diferenças percentuais que mostram quão mais eficaz é adicionar massa térmica nas paredes interiores comparando com os restantes elementos construtivos.

Tabela 22 – Diferenças percentuais entre os Ppi 's das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 W/(m^2.K)$

$\%P_{pi} U_{0,8}$			
$e [cm_{eb}]$	$\% \text{paredes interiores}$	$\% \text{paredes interiores}$	$\% \text{paredes interiores}$
	Vs	Vs	Vs
	$\text{paredes exteriores}$	paredes cobertura	$\text{paredes exteriores + cobertura}$
1	172,17	122,85	71,65
10	250,00	176,62	360,57
40	214,69	152,94	393,98

Repetindo a mesma análise para o edifício com um coeficiente de transmissão de $0,4 W/(m^2.K)$, apresentam-se as tabelas e figuras relevantes à análise crítica do desempenho térmico do modelo.

Os resultados indicam uma maior eficácia na redução das necessidades de climatização quando aumentada a massa térmica nas paredes interiores.

Tabela 23 - Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$

e [cmeb]	N''_{tot} [kWh/m ²] U0,4			
	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	21,12	21,12	21,12	21,12
10	16,82	16,45	12,55	13,88
40	14,93	14,42	8,08	10,69

Na figura 24 representam-se graficamente as necessidades de climatização em função da massa térmica, calculada na tabela 19, com as respetivas curvas de tendência traçadas e barras de erro (5%) associadas.

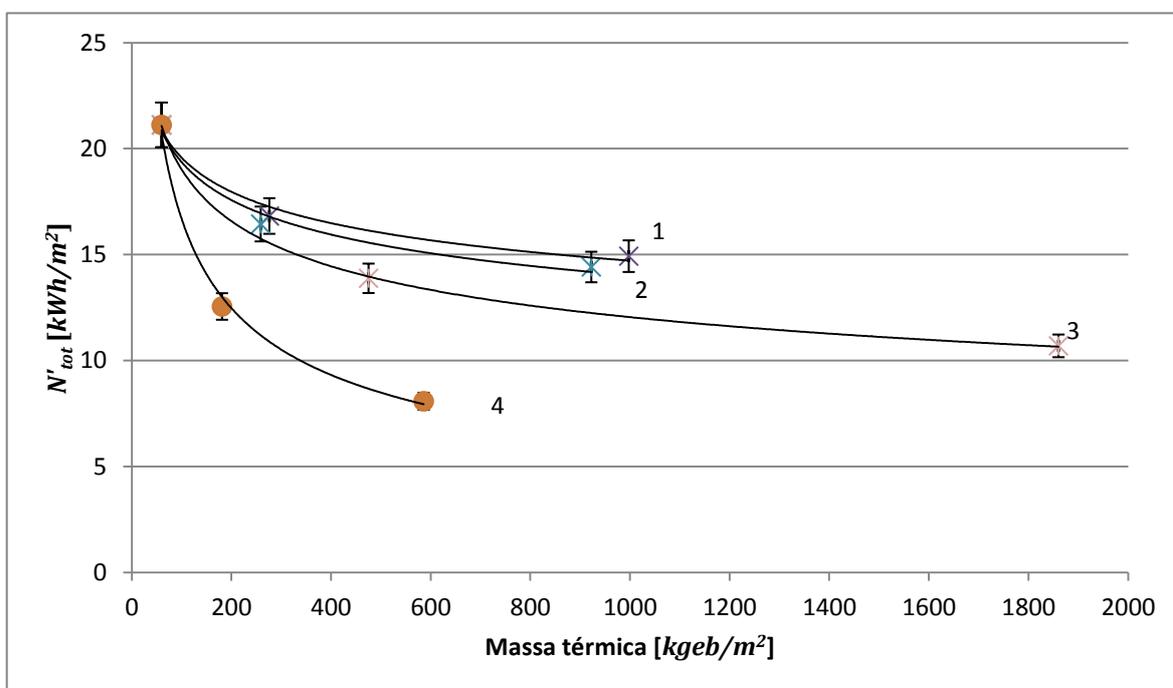


Figura 16 - Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos

1: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes exteriores.

- Equação: $y = 34,65x^{-0,124}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9839$

2: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada na cobertura.

- Equação: $y = 36,95x^{-0,140}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9817$

3: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada simultaneamente nas paredes exteriores e cobertura.

- Equação: $y = 47,37x^{-0,198}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9998$

4: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes interiores.

- Equação: $y = 115,57x^{-0,420}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9959$

Derivando cada uma das equações acima, obtêm-se as funções (para cada elemento construtivo) que descrevem e quantificam a poupança de energia de climatização por quilograma de massa térmica adicionada; ou Ppi .

Substituindo a variável pelo valor da massa térmica que caracteriza a solução leve, média e pesada de cada elemento construtivo, e agrupando os resultados na seguinte tabela, conclui-se quanto à poupança expectável ao adicionar-se massa térmica nos diferentes elementos para cada nível de inércia.

Tabela 24 - Ppi 's do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 W/(m^2.K)$

$e [cmeb]$	$Ppi [Wh/kgcb] U0,4$			
	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	43,41	48,89	146,08	69,97
10	7,76	9,18	30,19	5,83
40	1,83	2,16	5,70	1,14

Observa-se que o Ppi é superior nas paredes internas para qualquer nível de massa térmica. Na tabela abaixo encontram-se as diferenças percentuais que mostram quão mais eficaz é adicionar massa térmica nas paredes interiores comparando com os restantes elementos construtivos.

Tabela 25 - Diferenças percentuais entre os P_{pi} 's das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 W/(m^2.K)$

e [cm]	% P_{pi} U0,4		
	% paredes interiores V_s paredes exteriores	% paredes interiores V_s paredes cobertura	% paredes interiores V_s paredes exteriores + cobertura
	1	236,53	198,82
10	289,14	228,86	418,20
40	211,24	164,40	401,77

Repetindo a mesma análise para o edifício com um coeficiente de transmissão de $0,25 W/(m^2.K)$, apresentam-se as tabelas e figuras relevantes à análise crítica do desempenho térmico do modelo.

Tabela 26 - Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$

e [cm]	N''_{tot} [kWh/m ²] U0,25			
	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	14,04	14,04	14,04	14,04
10	11,05	10,93	7,82	9,14
40	9,55	9,40	4,58	6,64

Os resultados indicam uma maior eficácia na redução das necessidades de climatização quando aumentada a massa térmica nas paredes interiores.

Na figura 25 representam-se graficamente as necessidades de climatização em função da massa térmica, calculada na tabela 34, com as respetivas curvas de tendência traçadas e barras de erro (5%) associadas.

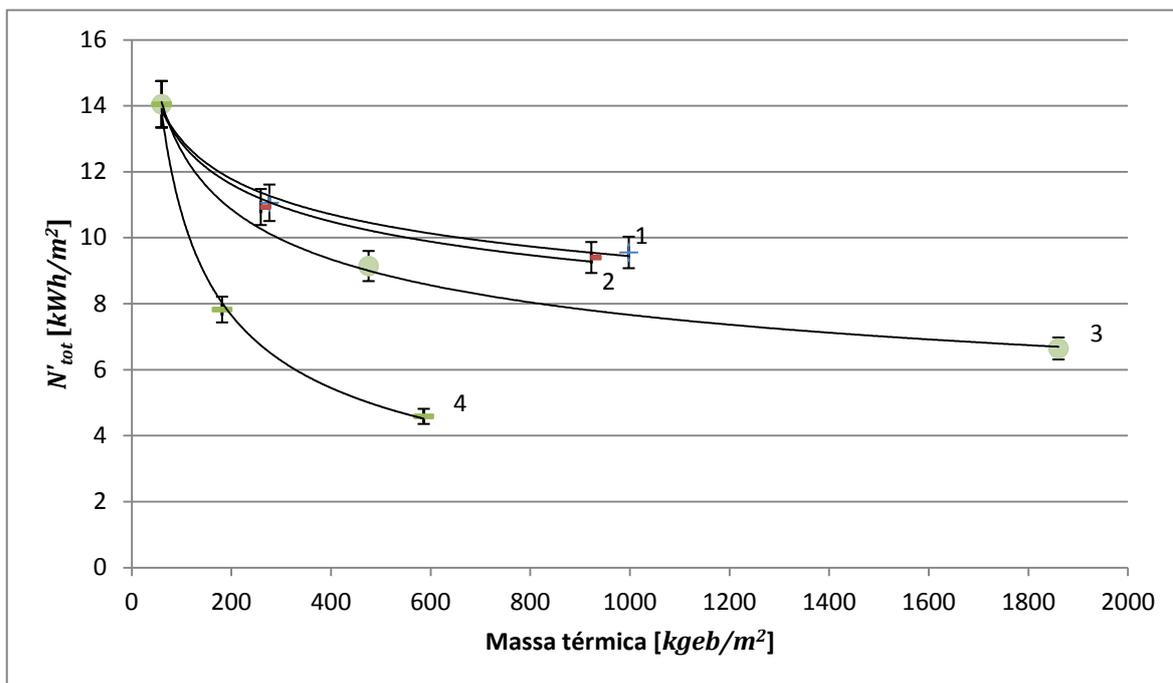


Figura 17 - Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos

1: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes exteriores.

- Equação: $y = 24,42x^{-0,138}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9924$

2: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada na cobertura.

- Equação: $y = 25,37x^{-0,147}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9898$

3: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada simultaneamente nas paredes exteriores e cobertura.

- Equação: $y = 34,28x^{-0,217}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9989$

4: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes interiores.

- Equação: $y = 102,70x^{-0,490}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9982$

Derivando cada uma das equações acima, obtêm-se as funções (para cada elemento construtivo) que descrevem e quantificam a poupança de energia de climatização por quilograma de massa térmica adicionada; ou Ppi .

Substituindo a variável pelo valor da massa térmica que caracteriza a solução leve, média e pesada de cada elemento construtivo, e agrupando os resultados na seguinte tabela, conclui-se quanto à poupança expectável ao adicionar-se massa térmica nos diferentes elementos para cada nível de inércia.

Tabela 27 - Ppi 's do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$

Ppi [Wh/kge_b] U0,25				
e [cme_b]	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	32,13	34,28	113,75	51,35
10	5,62	6,37	21,75	4,11
40	1,30	1,48	3,78	0,78

Observa-se que o Ppi é superior nas paredes internas para qualquer nível de massa térmica. Na tabela abaixo encontram-se as diferenças percentuais que mostram quão mais eficaz é adicionar massa térmica nas paredes interiores comparando com os restantes elementos construtivos.

Tabela 28 - Diferenças percentuais entre os Ppi 's das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$

%Ppi U0,25			
e [cme_b]	% paredes interiores V_s paredes exteriores	% paredes interiores V_s paredes cobertura	% paredes interiores V_s paredes exteriores + cobertura
1	254,07	231,89	121,53
10	287,02	241,43	429,18
40	190,29	155,10	384,36

Repetindo a mesma análise para o edifício com um coeficiente de transmissão de $0,1 W/(m^2.K)$, apresentam-se as tabelas e figuras relevantes à análise crítica do desempenho térmico do modelo.

Os resultados indicam uma maior eficácia na redução das necessidades de climatização quando aumentada a massa térmica nas paredes interiores.

Tabela 29 - Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$

e [cm eb]	N''_{tot} [kWh/m ²] U0,1			
	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	7,91	7,91	7,91	7,91
10	6,45	6,50	4,40	5,49
40	5,36	5,48	2,64	4,09

Na figura 26 representam-se graficamente as necessidades de climatização em função da massa térmica, calculada na tabela 34, com as respetivas curvas de tendência traçadas e barras de erro (5%) associadas.

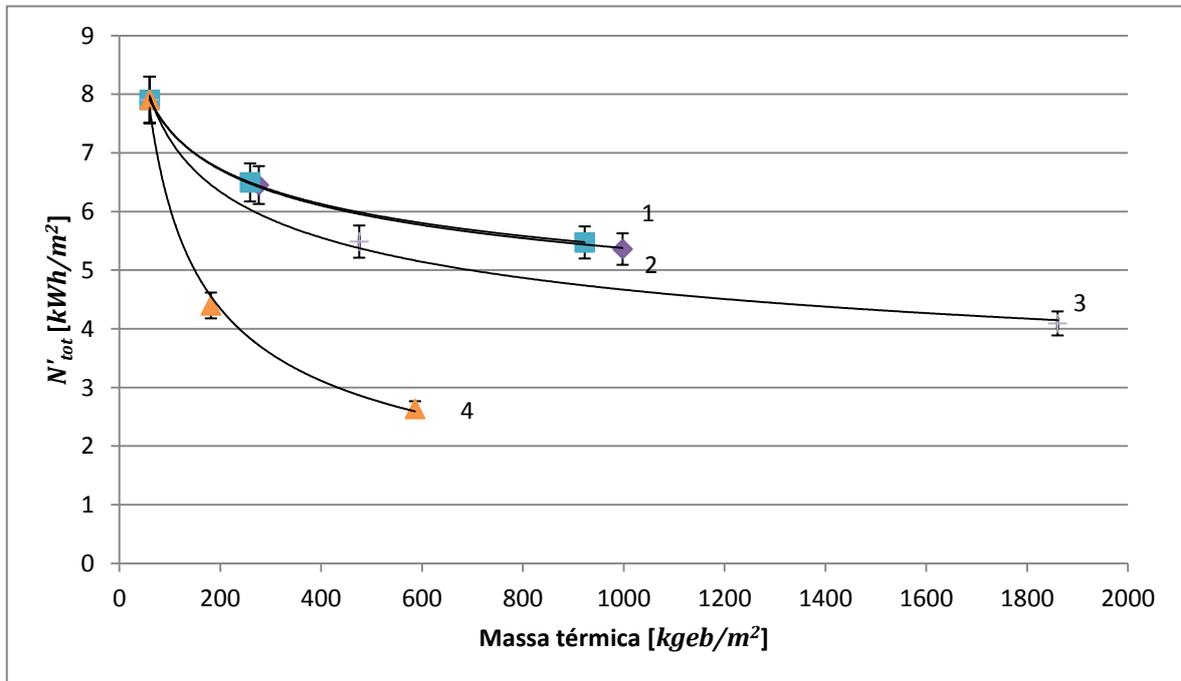


Figura 18 - Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos

1: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes exteriores.

- Equação: $y = 13,69x^{-0,134}$
- Fator de correlação: $R^2 = 1$

2: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada na cobertura.

- Equação: $y = 13,92x^{-0,138}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9994$

3: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada simultaneamente nas paredes exteriores e cobertura.

- Equação: $y = 17,34x^{-0,19}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9969$

4: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes interiores.

- Equação: $y = 55,39x^{-0,480}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9970$

Derivando cada uma das equações acima, obtêm-se as funções (para cada elemento construtivo) que descrevem e quantificam a poupança de energia de climatização por quilograma de massa térmica adicionada; ou *Ppi*.

Substituindo a variável pelo valor da massa térmica que caracteriza a solução leve, média e pesada de cada elemento construtivo, e agrupando os resultados na seguinte tabela, conclui-se quanto à poupança expectável ao adicionar-se massa térmica nos diferentes elementos para cada nível de inércia.

Tabela 30 - *Ppi*'s do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de 0,1 W/(m².K)

<i>Ppi</i> [Wh/kg e] U0,1				
<i>e</i> [cm e]	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	17,78	18,31	62,60	25,40
10	3,13	3,45	12,10	2,15
40	0,73	0,81	2,13	0,42

Observa-se que o *Ppi* é superior nas paredes internas para qualquer nível de massa térmica. Na tabela abaixo encontram-se as diferenças percentuais que mostram quão mais eficaz é adicionar massa térmica nas paredes interiores comparando com os restantes elementos construtivos.

Tabela 31 - Diferenças percentuais entre os *Ppi*'s das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para um coeficiente de transmissão térmica de 0,1 W/(m².K)

% <i>Ppi</i> U0,1			
<i>e</i> [cm e]	% paredes interiores	% paredes interiores	% paredes interiores
	Vs paredes exteriores	Vs paredes cobertura	Vs paredes exteriores + cobertura
1	252,05	241,84	146,51
10	286,74	250,92	462,98
40	192,00	162,28	402,53

Como se pode verificar, o benefício da adição de massa térmica nas paredes interiores é transversal a qualquer resistência térmica da envolvente, sendo sempre mais eficaz incluir massa térmica nas paredes interiores do que nos restantes elementos construtivos.

A hipótese sugerida para explicar o melhor desempenho térmico das paredes interiores, resume-se nas seguintes ideias:

- As necessidades de arrefecimento são reduzidas mais eficazmente pelo aumento de massa térmica nas paredes interiores, porque radiação solar aquece a envolvente exterior de tal forma que poderá não existir um gradiente de temperatura útil (tanto menos útil quanto menor for a camada de isolamento) que promova a absorção de calor pela envolvente exterior. E a radiação solar que é absorvida pela envolvente, apesar de contribuir positivamente para a redução das necessidades de arrefecimento, nem todo esse calor é dissipado, e parte dele acabará por ser conduzido para o interior do edifício (tanto mais quanto menor for a camada de isolamento).

As paredes interiores não estando sujeitas à radiação solar, mantêm uma temperatura que no limite é igual àquela do ar climatizado, estando normalmente disponível um gradiente térmico caso a temperatura do ar interior aumente subitamente.

- As necessidades de aquecimento são mais eficazmente reduzidas pelo aumento de massa térmica nas paredes interiores, porque o calor que é absorvido pelas paredes interiores – colocando a hipótese de estarem estabelecidas as condições de conforto e o sistema de aquecimento se desligar - não se perde. Mantém-se armazenado dentro do material o tempo que as condições ditarem, e quando é libertado, é-o para dentro do edifício e esse calor é útil na manutenção das condições de conforto, conservando consumos energéticos de aquecimento. Por outro lado, parte do calor absorvido pela envolvente será transferido para o exterior (tanto mais quanto menor for a camada de isolamento), existindo um gradiente térmico resultante das menores temperaturas ambiente características da estação de aquecimento. Equacionando os ganhos solares de inverno, o aproveitamento destes (que é tanto maior quanto menor for a camada de isolamento) não é suficiente para compensar a capacidade de rentabilização da carga térmica armazenada pelas paredes interiores.

O facto da temperatura das paredes interiores não ser função direta das condições exteriores – radiação solar e amplitude térmica diária -, como acontece com as paredes exteriores e cobertura, permite uma maior “disponibilidade térmica”, disponibilidade em absorver ou libertar calor sempre que necessário. Em regime estacionário, as paredes interiores possuem a mesma temperatura do ar climatizado, permitindo que se crie, quase instantaneamente, um gradiente útil à transferência de calor, quer o ar interior aumente ou diminua a sua temperatura de forma indesejada, contribuindo, assim, para a manutenção das condições de conforto e redução das necessidades de climatização.

Por outro lado, pode não existir qualquer disponibilidade térmica por parte dos elementos da envolvente exterior, podendo estes ser responsáveis pela transferência térmica em sentido oposto ao pretendido, no sentido da deterioração das condições de conforto, caso as condições exteriores forem exigentes a esse ponto.

Seria interessante testar os modelos noutras condições climatéricas, onde os ganhos solares fossem manifestamente inferiores, e perceber se o paradigma acima descrito ficaria comprometido.

3.3.2.2 Edifício com cargas térmicas internas relevantes

A partir do estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, apresentam-se as tabelas e figuras relevantes à análise crítica do desempenho térmico do modelo.

Tabela 32 – Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

e [cmeb]	$N''_{tot} [\text{kWh}/\text{m}^2] \text{ U}0,8$			
	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	54,07	54,07	54,07	54,07
10	43,20	41,47	33,66	35,73
40	41,61	39,00	29,51	32,63

Tal como sucede no edifício com cargas térmicas internas reduzidas, o aumento de massa térmica nas paredes interiores reduz mais eficazmente as necessidades de climatização.

Na figura 27 representam-se graficamente as necessidades de climatização em função da massa térmica, calculada na tabela 34, com as respetivas curvas de tendência traçadas e barras de erro (5%) associadas.

Comparativamente com as curvas de tendência encontradas para o edifício sujeito a cargas térmicas internas reduzidas, neste caso as funções aproximadas não se apresentam com a mesma exatidão do anterior modelo estudado. O ponto que representa as necessidades de climatização da solução de média massa térmica está consideravelmente desfasado da curva que o tenta unir aos restantes, quase nunca dentro dum intervalo de erro de $\pm 5\%$.

Para uma análise mais metódica, deveriam ser considerados mais níveis de massa térmica, evitando aproximar a tendência das necessidades de climatização por uma função que subestima tão claramente o potencial de poupança para o intervalo de massa térmica

leve a média, e sobrestima o mesmo potencial considerando a massa térmica média a pesada.

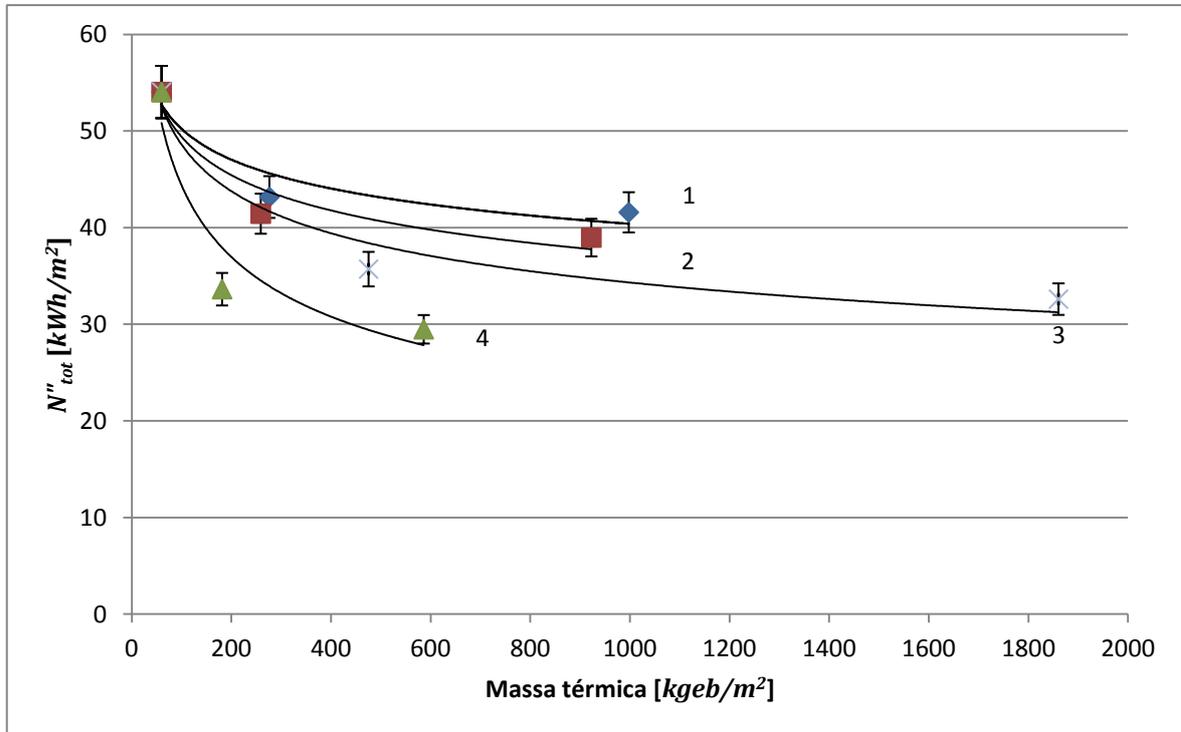


Figura 19 – Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos

As necessidades de climatização tendem para um valor assintótico com o aumento de massa térmica, e quanto mais bem isolado for o edifício mais evidente esta observação se torna. As funções encontradas que aproximam a tendência evolutiva das necessidades não mostram este facto, não evidenciando todo o potencial no aumento inicial de massa térmica partindo de um edifício leve, e não considerando a estagnação desse potencial quando o edifício já tem um nível de massa térmico médio/pesado.

1: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes exteriores.

- Equação: $y = 77,66x^{-0,095}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,8884$

2: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada na cobertura.

- Equação: $y = 86,20x^{-0,121}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9102$

3: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada simultaneamente nas paredes exteriores e cobertura.

- Equação: $y = 97,48x^{-0,151}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9457$

4: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes interiores.

- Equação: $y = 149,40x^{-0,264}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,894$

Derivando cada uma das equações acima, obtêm-se as funções (para cada elemento construtivo) que descrevem e quantificam a poupança de energia de climatização por quilograma de massa térmica adicionada; ou Ppi .

Substituindo a variável pelo valor da massa térmica que caracteriza a solução leve, média e pesada de cada elemento construtivo, e agrupando os resultados na seguinte tabela, conclui-se quanto à poupança expectável ao adicionar-se massa térmica nos diferentes elementos para cada nível de inércia.

Tabela 33 – Ppi 's do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de 0,8 W/(m².K)

Ppi [Wh/kg_{eb}] U0,8				
e [cm_{eb}]	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	83,88	109,04	224,62	133,07
10	15,67	21,05	55,20	12,21
40	3,84	5,06	12,51	2,54

Observa-se que o Ppi é superior nas paredes internas para qualquer nível de massa térmica. Na tabela abaixo encontram-se as diferenças percentuais que mostram quão mais eficaz é adicionar massa térmica nas paredes interiores comparando com os restantes elementos construtivos.

Tabela 34 – Diferenças percentuais entre os Ppi 's das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de 0,8 W/(m².K)

%Ppi U0,8			
e [cm_{eb}]	% paredes interiores Vs paredes exteriores	% paredes interiores Vs paredes cobertura	% paredes interiores Vs paredes exteriores + cobertura
1	167,79	105,99	68,80
10	252,21	162,16	351,92
40	225,95	147,10	392,89

Repetindo a mesma análise para o edifício com um coeficiente de transmissão de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, apresentam-se as tabelas e figuras relevantes à análise crítica do desempenho térmico do modelo.

Tabela 35 - Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

e [cmeb]	$N_{tot} \text{ [kWh/m}^2\text{] } U0,4$			
	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	41,81	41,81	41,81	41,81
10	34,95	34,13	27,61	30,33
40	34,11	32,97	24,82	28,40

Os resultados indicam uma maior eficácia na redução das necessidades de climatização quando aumentada a massa térmica nas paredes interiores.

Na figura 28 representam-se graficamente as necessidades de climatização em função da massa térmica, calculada na tabela 34, com as respetivas curvas de tendência traçadas e barras de erro (5%) associadas.

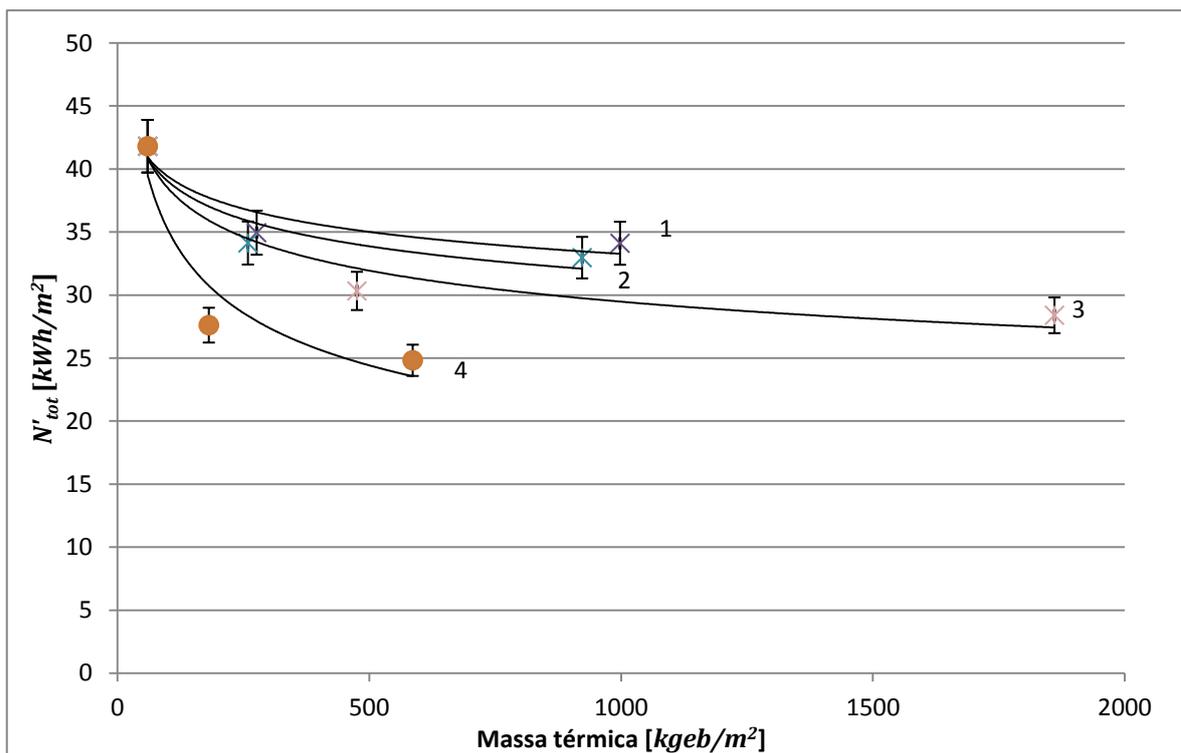


Figura 20 - Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos

1: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes exteriores.

- Equação: $y = 55,33x^{-0,074}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,8737$

2: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada na cobertura.

- Equação: $y = 58,53x^{-0,088}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,8842$

3: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada simultaneamente nas paredes exteriores e cobertura.

- Equação: $y = 65,62x^{-0,116}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9409$

4: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes interiores.

- Equação: $y = 100,01x^{-0,227}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,8855$

Derivando cada uma das equações acima, obtêm-se as funções (para cada elemento construtivo) que descrevem e quantificam a poupança de energia de climatização por quilograma de massa térmica adicionada; ou Ppi .

Substituindo a variável pelo valor da massa térmica que caracteriza a solução leve, média e pesada de cada elemento construtivo, e agrupando os resultados na seguinte tabela, conclui-se quanto à poupança expectável ao adicionar-se massa térmica nos diferentes elementos para cada nível de inércia.

Tabela 36 - Ppi 's do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$

$e \text{ [cmeb]}$	$Ppi \text{ [Wh/kgcb]} \text{ U0,4}$			
	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	50,65	60,23	150,40	79,38
10	9,77	12,21	38,51	7,83
40	2,46	3,06	9,12	1,71

Observa-se que o Ppi é superior nas paredes internas para qualquer nível de massa térmica. Na tabela abaixo encontram-se as diferenças percentuais que mostram quão mais eficaz é adicionar massa térmica nas paredes interiores comparando com os restantes elementos construtivos.

Tabela 37 - Diferenças percentuais entre os P_{pi} 's das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 W/(m^2.K)$

e [cmeb]	% P_{pi} U0,4		
	% paredes interiores V_s paredes exteriores	% paredes interiores V_s paredes cobertura	% paredes interiores V_s paredes exteriores + cobertura
	1	196,91	149,69
10	294,01	215,45	391,50
40	270,69	197,77	433,75

Repetindo a mesma análise para o edifício com um coeficiente de transmissão de $0,25 W/(m^2.K)$, apresentam-se as tabelas e figuras relevantes à análise crítica do desempenho térmico do modelo.

Os resultados indicam uma maior eficácia na redução das necessidades de climatização quando aumentada a massa térmica nas paredes interiores.

Tabela 38 - Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$

e [cmeb]	N''_{tot} [kWh/m ²] U0,25			
	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	35,86	35,86	35,86	35,86
10	30,97	30,58	25,26	27,74
40	30,35	29,89	23,47	26,38

Na figura 29 representam-se graficamente as necessidades de climatização em função da massa térmica, calculada na tabela 34, com as respetivas curvas de tendência traçadas e barras de erro (5%) associadas.

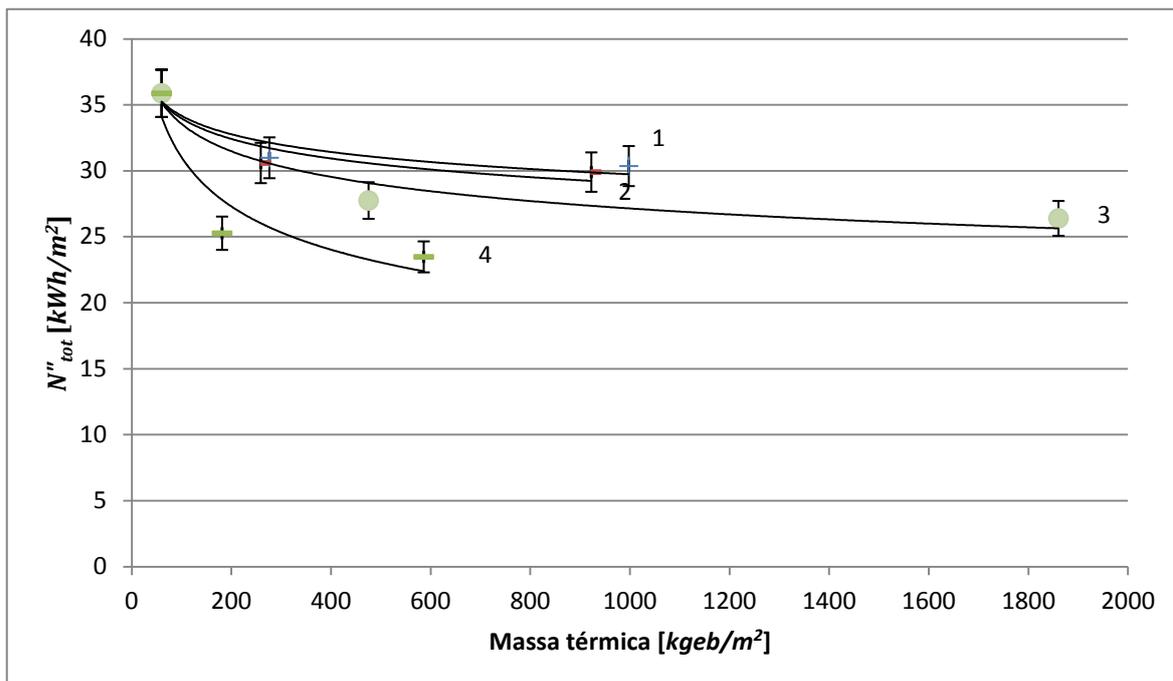


Figura 21 - Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos

1: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes exteriores.

- Equação: $y = 45,13x^{-0,06}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,8758$

2: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada na cobertura.

- Equação: $y = 46,37x^{-0,068}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,8715$

3: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada simultaneamente nas paredes exteriores e cobertura.

- Equação: $y = 51,27x^{-0,092}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9377$

4: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes interiores.

- Equação: $y = 72,54x^{-0,184}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,8647$

Derivando cada uma das equações acima, obtêm-se as funções (para cada elemento construtivo) que descrevem e quantificam a poupança de energia de climatização por quilograma de massa térmica adicionada; ou Ppi .

Substituindo a variável pelo valor da massa térmica que caracteriza a solução leve, média e pesada de cada elemento construtivo, e agrupando os resultados na seguinte tabela, conclui-se quanto à poupança expectável ao adicionar-se massa térmica nos diferentes elementos para cada nível de inércia.

Tabela 39 - Ppi 's do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$

$Ppi [Wh/kg_{eb}] U_{0,25}$				
$e [cm_{eb}]$	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	35,51	39,98	105,45	54,31
10	7,00	8,34	28,32	5,63
40	1,79	2,15	7,05	1,27

Observa-se que o Ppi é superior nas paredes internas para qualquer nível de massa térmica. Na tabela abaixo encontram-se as diferenças percentuais que mostram quão mais eficaz é adicionar massa térmica nas paredes interiores comparando com os restantes elementos construtivos.

Tabela 40 - Diferenças percentuais entre os Ppi 's das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$

$\%_{Ppi} U_{0,25}$			
$e [cm_{eb}]$	$\% \text{ paredes interiores } V_s$ <i>paredes exteriores</i>	$\% \text{ paredes interiores } V_s$ <i>paredes cobertura</i>	$\% \text{ paredes interiores } V_s$ <i>paredes exteriores + cobertura</i>
1	196,92	163,75	94,17
10	304,54	239,41	402,65
40	293,16	228,52	455,62

Repetindo a mesma análise para o edifício com um coeficiente de transmissão de $0,1 W/(m^2.K)$, apresentam-se as tabelas e figuras relevantes à análise crítica do desempenho térmico do modelo.

Os resultados indicam uma maior eficácia na redução das necessidades de climatização quando aumentada a massa térmica nas paredes interiores.

Na figura 30 representam-se graficamente as necessidades de climatização em função da massa térmica, calculada na tabela 34, com as respetivas curvas de tendência traçadas e barras de erro (5%) associadas.

Tabela 41 - Necessidades de climatização do edifício sujeito a cargas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$

e [cmeb]	N''_{tot} [kWh/m ²] U0,1			
	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	29,72	29,72	29,72	29,72
10	27,24	27,37	23,51	25,79
40	26,77	27,00	22,17	25,20

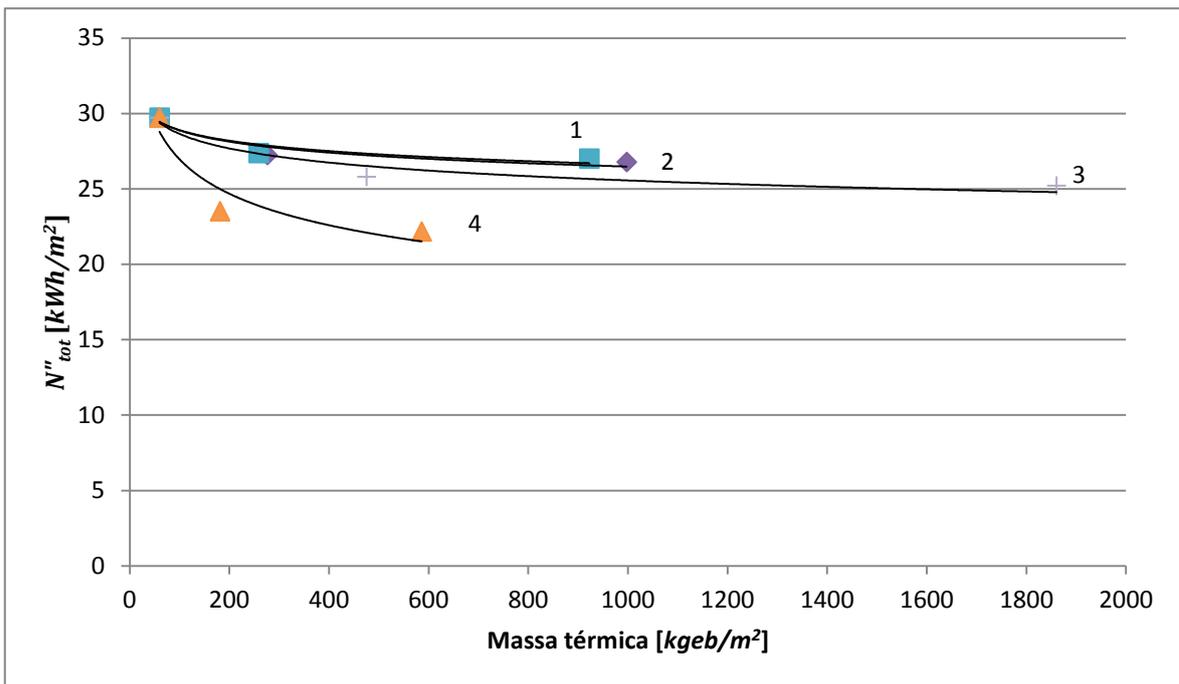


Figura 22 - Representação gráfica das necessidades de climatização, do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes e com um coeficiente de transmissão térmica de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, em função da massa térmica adicionada nos diferentes elementos construtivos

1: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes exteriores.

- Equação: $y = 34,04x^{-0,036}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,8819$

2: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada na cobertura.

- Equação: $y = 34,34x^{-0,038}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9021$

3: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada simultaneamente nas paredes exteriores e cobertura.

- Equação: $y = 35,99x^{-0,05}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,9263$

4: Curva de tendência das necessidades de climatização em função da massa térmica adicionada nas paredes interiores.

- Equação: $y = 48,50x^{-0,128}$
- Fator de correlação: $R^2 = 0,8829$

Derivando cada uma das equações acima, obtêm-se as funções (para cada elemento construtivo) que descrevem e quantificam a poupança de energia de climatização por quilograma de massa térmica adicionada; ou Ppi .

Substituindo a variável pelo valor da massa térmica que caracteriza a solução leve, média e pesada de cada elemento construtivo, e agrupando os resultados na seguinte tabela, conclui-se quanto à poupança expectável ao adicionar-se massa térmica nos diferentes elementos para cada nível de inércia.

Tabela 42 - Ppi 's do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de 0,1 W/(m².K)

Ppi [Wh/kg_{eb}] U0,1				
e [cm_{eb}]	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Paredes exteriores + Cobertura
1	17,72	18,73	61,65	24,59
10	3,62	4,08	17,62	2,78
40	0,96	1,09	4,69	0,66

Observa-se que o Ppi é superior nas paredes internas para qualquer nível de massa térmica. Na tabela abaixo encontram-se as diferenças percentuais que mostram quão mais eficaz é adicionar massa térmica nas paredes interiores comparando com os restantes elementos construtivos.

Tabela 43 - Diferenças percentuais entre os Ppi 's das paredes interiores e dos restantes elementos em estudo do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes para um coeficiente de transmissão térmica de 0,1 W/(m².K)

%Ppi U0,1			
e [cm_{eb}]	% paredes interiores Vs paredes exteriores	% paredes interiores Vs paredes cobertura	% paredes interiores Vs paredes exteriores + cobertura
1	247,90	229,25	150,71
10	386,18	331,47	533,03
40	389,31	329,32	605,67

O benefício da adição de massa térmica nas paredes interiores não é apenas transversal a qualquer resistência térmica da envolvente, também se mantém quando o edifício é sujeito a elevadas cargas térmicas internas.

A hipótese sugerida no fim da análise do modelo anterior, para explicar o melhor desempenho térmico das paredes interiores, aplica-se também a este caso.

Verifica-se que o aumento de massa térmica neste edifício em estudo tem um benefício superior àquele registado no modelo com cargas térmicas internas reduzidas, quando se considera o aumento aplicado ao edifício leve inicial. Esse potencial é na verdade superior àquele calculado pela função aproximada, uma vez que a curva passa substancialmente acima do ponto das necessidades de climatização reais para elemento de massa térmica média (segundo ponto). Por outro lado, o Ppi calculado pela função quando o edifício possui o elemento de massa térmica pesado (terceiro ponto), está sobredimensionado, sendo que a função aproximada passa abaixo do ponto de necessidades reais. Conclui-se que para continuar a reduzir as necessidades de arrefecimento num edifício com elementos construtivos pesados, nestas condições de ganhos internos, é necessário recorrer a outras estratégias de climatização para além da inércia térmica.

Reforça-se a ideia de que os elementos da envolvente exterior não são tão eficazes na absorção de carga térmica devido ao facto da temperatura da envolvente ser responsável por um gradiente térmico pouco útil à transferência térmica. E no caso do edifício sujeito a cargas térmicas internas relevantes existe uma elevada potência calorífica a necessitar ser dissipada e/ou armazenada, amplificando a diferença que existe em termos de eficácia de absorção de calor entre as paredes interiores e os elementos da envolvente exterior.

As necessidades de aquecimento não desempenham um papel importante no comportamento térmico deste modelo em análise, sendo que os ganhos internos são quase suficientes para compensar as perdas de calor pela envolvente. De qualquer forma, mantém-se válido o segundo ponto referido na hipótese apresentada no subcapítulo anterior, apenas a uma escala mais pequena.

3.4 Estratégia de otimização do edifício LSF e análise comparativa entre o comportamento térmico de várias soluções

3.4.1 Caracterização de caso de referência

O caso de referência em estudo volta a ser o descrito no capítulo 2, em que os modelos construtivos definidos tentam aproximar-se de soluções reais sob condições de reduzidas e elevadas cargas térmicas internas e para os vários níveis de isolamento definidos.

Para além das duas soluções construtivas já analisadas - LSF e convencional - serão simuladas outras duas: o edifício de betão armado que se caracteriza por uma muito forte inércia térmica, sendo interessante ter esta solução para efeitos comparativos; e o edifício LSF melhorado pela incorporação de massa térmica nas paredes interiores.

Com os conhecimentos adquiridos do subcapítulo anterior, concluiu-se que é nas paredes interiores onde existe o maior benefício da massa térmica, e esse elemento construtivo no edifício LSF – onde o espaço entre perfis metálicos, fechado por painéis cimentícios ou de gesso cartonado, é tipicamente preenchido com isolamento térmico e acústico – possui uma baixa densidade energética, cerca de 70% inferior à das paredes interiores convencionais.

A solução de adicionar massa nas paredes internas também é interessante do ponto de vista prático e económico, uma vez que a quantidade de massa efetivamente adicionada para uma determinada espessura de material é consideravelmente inferior ao caso da adição nos elementos da envolvente exterior, o que se reflete na praticidade e custo da solução.

Identificado o elemento construtivo onde será incorporada massa térmica, falta decidir qual o material a incluir nas paredes interiores. O critério de escolha recai totalmente nas propriedades termofísicas que resultam no material com melhor capacidade de armazenar calor. No entanto, deve ser tido em conta que não é intenção comprometer os conceitos de sustentabilidade, ecologia e eficiência característicos do método construtivo LSF.

Nas seguintes tabelas apresentam-se a *m_{eb}* e *e_{eb}* de diversos materiais, calculados pelas equações 9 e 10, candidatos a massa térmica a incluir nas paredes interiores do edifício LSF. Interessa que esses valores sejam os mais elevados possíveis, rentabilizando ao máximo a quantidade de material que se adiciona.

O material que apresenta uma maior *m_{eb}* e *e_{eb}* é a água. Um quilograma de água é capaz de armazenar 4,19 vezes mais calor do que um quilograma de betão, e equacionando as densidades de modo a confinar a massa num determinado volume – algo que é um constrangimento na caracterização dos elementos construtivos –, um centímetro de água para uma dada área de elemento, perfazendo um certo volume, consegue armazenar 2,1 vezes mais carga térmica do que o mesmo volume de betão.

Tabela 44 - *m_{eb}* de diferentes materiais

<i>m</i> [kg]	Material	ρ	c_p	<i>m_{eb}</i> [kgeb]
1	Betão	2000	1000	1,00
1	Tijolo cerâmico	1920	840	0,84
1	Granito	2600	1000	1,00
1	Mármore	2800	1000	1,00
1	Areia e gravilha	1950	1045	1,05
1	Terra	1460	880	0,88
1	Água	1000	4190	4,19

Tabela 45 - *eeb* de diferentes materiais

<i>e</i> [cm]	Material	ρ	c_p	<i>eeb</i> [cm eb]
1	Betão	2000	1000	1,00
1	Tijolo cerâmico	1920	840	0,81
1	Granito	2600	1000	1,30
1	Mármore	2800	1000	1,40
1	Areia e gravilha	1950	1045	1,02
1	Terra	1460	880	0,64
1	Água	1000	4190	2,10

Assim, nesta análise, será considerado a água como material de massa térmica a incluir nas paredes interiores do edifício LSF, definindo-se uma espessura de 10cm ou 21cm eb . E além de ser o melhor material em termos térmicos, pelo lado pragmático: a água é barata, abundante, tem uma reduzida energia embebida (vinda da rede pública, e será nula se considerarmos a água da chuva) quando comparada com materiais construtivos típicos. Em termos práticos, é necessário encontrar uma solução que permita conter a água de forma segura e expedita dentro de um elemento construtivo.

A condutividade térmica ainda não foi referida como propriedade a ter em conta na escolha do material de massa térmica. A taxa de transferência de calor é diretamente proporcional à condutividade térmica do material onde ocorre a condução, pela lei de Fourier. Assim, quanto maior for a condutividade térmica do material massa térmica, mais rápida será a transferência térmica do ar para o material e vice-versa.

À partida, qualquer material isolante seria excluído como candidato a massa térmica, uma vez que o gradiente de temperaturas entre o ar e a superfície do material seria rapidamente minimizado sendo o material ineficaz a conduzir esse calor para camadas mais interiores do corpo. Apesar disto, os materiais isolantes têm uma reduzida densidade energética, portanto nem chegariam a ser considerados como candidatos.

É importante, no entanto, considerar as condutividades térmicas dos materiais apresentados acima, valores com um intervalo considerável que variam dos 0,6 W/(m.K) aos 3,5 W/(m.K) - sendo o valor mais baixo respetivo à água, e o mais alto ao mármore. Apesar destas diferenças influenciarem a taxa de transferência de calor, verificou-se que a densidade energética e espessura do material são suficientes na qualificação da massa térmica; para a mesma *eeb*, as necessidades de climatização anuais não sofreram alterações significativas quando usada a água ou o mármore, e é nesse período anual que interessa analisar o problema.

Mesmo considerando a condutividade térmica na qualificação da massa térmica, nunca poderia ter o mesmo peso da densidade e calor específico. Se um material tem um calor específico baixo, pode compensar com uma densidade elevada para garantir a mesma capacidade de armazenamento térmico de um outro material com um calor específico elevado e densidade baixa. Esta linearidade não é traduzível para a condutividade térmica,

não sendo possível compensar uma baixa densidade energética com uma condutividade térmica alta de modo a garantir uma boa capacidade de absorção calorífica.

3.4.1.1 Caracterização das opções construtivas

Os pavimentos, envidraçados, caixilharias, portas e dispositivos de sombreamento não variam das soluções adotadas nos capítulos anterior, sendo mantido todo e qualquer parâmetro definido na caracterização dos modelos.

Nas opções construtivas apresentadas, não se considera qualquer efeito de ventilação dentro dos elementos, sendo os conjuntos apresentados compostos, na íntegra, por materiais sólidos.

Repetindo a tabela 4 apresentada no capítulo 2, mas incluindo a massa útil do edifício LSF melhorado:

Tabela 46 – Massa útil dos diferentes edifícios em estudo

Massa útil [kg/m^2]			
LSF	Convencional	Betão	LSF melhorado
136,87	1098,78	1896,45	204,34

Os edifícios LSF e convencional já foram caracterizados no Capítulo 2, mantendo-se inalterados para esta análise.

Na tabela 47 apresenta-se a solução construtiva do edifício de betão armado para um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 W/(m^2.K)$, remetendo-se para o Anexo III as soluções construtivas relativas aos restantes níveis de isolamento térmico.

Como referido anteriormente, será incluída água dentro das paredes interiores do edifício LSF melhorado, definindo-se uma espessura de $10cm$ igual à espessura de alvenaria de tijolo cerâmico do edifício convencional e à espessura de betão do edifício de betão armado. O reservatório que contém a água também foi incluído na definição do elemento construtivo, considerando-se duas espessuras de $3 mm$ de polipropileno no corte transversal do elemento.

Na tabela 48 apresenta-se a solução construtiva do edifício LSF melhorado para um coeficiente de transmissão térmica de $0,8 W/(m^2.K)$, sendo que as soluções referentes aos restantes níveis de isolamento se encontram nas tabelas AIII.4 a AIII.6.

Tabela 47 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício de betão para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de 0,8 W/(m².K)

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [m ² .K/W]	Densidade energética D [kJ/(m ³ .K)]
Paredes exteriores U0,8	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	1,25	2031,84
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	2,97		
	Betão armado	2,30	1000	2300	30,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,8	Telha cerâmica	1,00	800	2000	2,50	1,25	2012,03
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	3,19		
	Laje de betão armado	2,30	1000	2300	30,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30	-	1892,37
	Betão	1,13	1000	2000	10,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		

Tabela 48 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício LSF melhorado para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de 0,8 W/(m².K)

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [m ² . K/W]	Densidade energética D [kJ/(m ³ . K)]
Paredes exteriores U0,8	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	1,25	810,84
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	2,88		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,8	Rufo metálico	0,29	1000	1250	0,07	1,25	653,58
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	3,01		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30	-	3539,90
	Polipropileno	0,22	1800	910	0,30		
	Água	0,60	4190	1000	10,00		
	Polipropileno	0,22	1800	910	0,30		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		

3.4.1.2 Indicadores de desempenho térmico e energético

A abordagem a esta análise será igual à do capítulo 2, onde as necessidades de climatização anuais por unidade de área útil de pavimento [kWh/m²] são o principal indicador de desempenho térmico e energético dos modelos construtivos.

O fator de atraso (φ) e fator de amortecimento (f) do edifício de betão e LSF melhorado para cada nível de isolamento térmico, são apresentados nas seguintes tabelas.

Os dados usados para calcular as propriedades foram obtidos recorrendo aos modelos definidos especialmente para o efeito, cujos pressupostos estão explicados no capítulo 2.3.5.

Tabela 49 – Fator de atraso e fator de amortecimento do edifício de betão para cada nível de isolamento

	Fator de atraso φ [h]	Fator de amortecimento f
Betão U0,8	16	0,029
Betão U0,4	17	0,027
Betão U0,25	17	0,020
Betão U0,1	17	0,012

Tabela 50 – Fator de atraso e fator de amortecimento do edifício LSF melhorado para cada nível de isolamento

	Fator de atraso φ [h]	Fator de amortecimento f
LSF U0,8	2	0,11
LSF U0,4	3	0,054
LSF U0,25	5	0,035
LSF U0,1	13	0,014

O edifício de betão armado tem o maior fator de atraso e o menor fator de amortecimento de todas as soluções construtivas testadas, dando indicação de um

comportamento térmico mais eficaz que se deverá traduzir em menores necessidades de climatização.

Com a adição de água nas paredes internas do edifício LSF a temperatura interior estabilizou comparativamente com a situação inicial, apresentando um fator de amortecimento mais reduzido. Fica, no entanto, quase sempre aquém dos valores atingidos por ambos os edifícios convencional e de betão.

Quanto ao fator de atraso, os resultados obtidos mostram um intervalo substancialmente mais curto, não só dos edifícios com forte inércia térmica, mas também em relação ao edifício LSF original. Para justificar estes resultados coloca-se a hipótese das menores temperaturas interiores sentidas no modelo com paredes de água promoveram uma maior taxa de transferência de calor de fora para dentro, acelerando a “onda de calor”; se a temperatura interior é inferior porque uma boa parte da carga térmica é absorvida pela água (que não existe nos elementos da envolvente exterior), então existe um maior gradiente térmico que promove a transferência de calor por condução pela envolvente opaca, envolvente essa que não tem mais massa térmica do que o edifício LSF original, e assim a “onda de calor” chega mais rapidamente ao interior.

3.4.2 Análise crítica de resultados

3.4.2.1 Edifícios com cargas térmicas internas reduzidas

As necessidades de climatização anuais do edifício LSF e convencional, para cada nível de isolamento térmico, voltam a ser apresentados para um melhor enquadramento do problema, incluindo de seguida as necessidades do edifício de betão e LSF melhorado.

Tabela 51 - Necessidades de climatização do edifício LSF sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica

R'' [$m^2 \cdot K/W$]	N''_{arr} [kWh/m^2]	N''_{aq} [kWh/m^2]	N''_{tot} [kWh/m^2]
1,25	10,42	26,97	37,39
2,5	7,23	10,46	17,69
4	6,13	5,50	11,63
10	4,94	1,85	6,79

Tabela 52 - Necessidades de climatização do edifício convencional sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica

R'' [$m^2 \cdot K/W$]	N''_{arr} [kWh/m^2]	N''_{aq} [kWh/m^2]	N''_{tot} [kWh/m^2]
1,25	7,82	14,80	22,62
2,5	5,52	4,36	9,88
4	4,58	1,66	6,24
10	3,54	0,21	3,75

Tabela 53 - Necessidades de climatização do edifício de betão armado sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica

R'' [$m^2 \cdot K/W$]	N''_{arr} [kWh/m^2]	N''_{aq} [kWh/m^2]	N''_{tot} [kWh/m^2]
1,25	6,87	13,08	19,95
2,5	4,85	3,03	7,88
4	3,98	0,96	4,94
10	3,06	0,03	3,10

Tabela 54 - Necessidades de climatização do edifício LSF melhorado sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica

R'' [$m^2 \cdot K/W$]	N''_{arr} [kWh/m^2]	N''_{aq} [kWh/m^2]	N''_{tot} [kWh/m^2]
1,25	5,44	19,53	24,97
2,5	3,98	5,51	9,49
4	3,42	1,90	5,32
10	2,85	0,13	2,97

Na figura 31 as necessidades de climatização dos quatro edifícios são agrupadas para cada valor comum de resistência térmica.

O edifício LSF melhorado apresenta-se com um muito melhor comportamento térmico face à solução LSF inicial, superando, inclusive, o edifício convencional a partir de uma resistência térmica de $2,5 m^2 \cdot K/W$ e o edifício de betão para um R de $10 m^2 \cdot K/W$. Prova-se, assim, que a estratégia de otimização do edifício LSF, adicionando-se massa térmica de elevada densidade energética nas paredes interiores, resulta numa redução muito interessante das necessidades de climatização anuais.

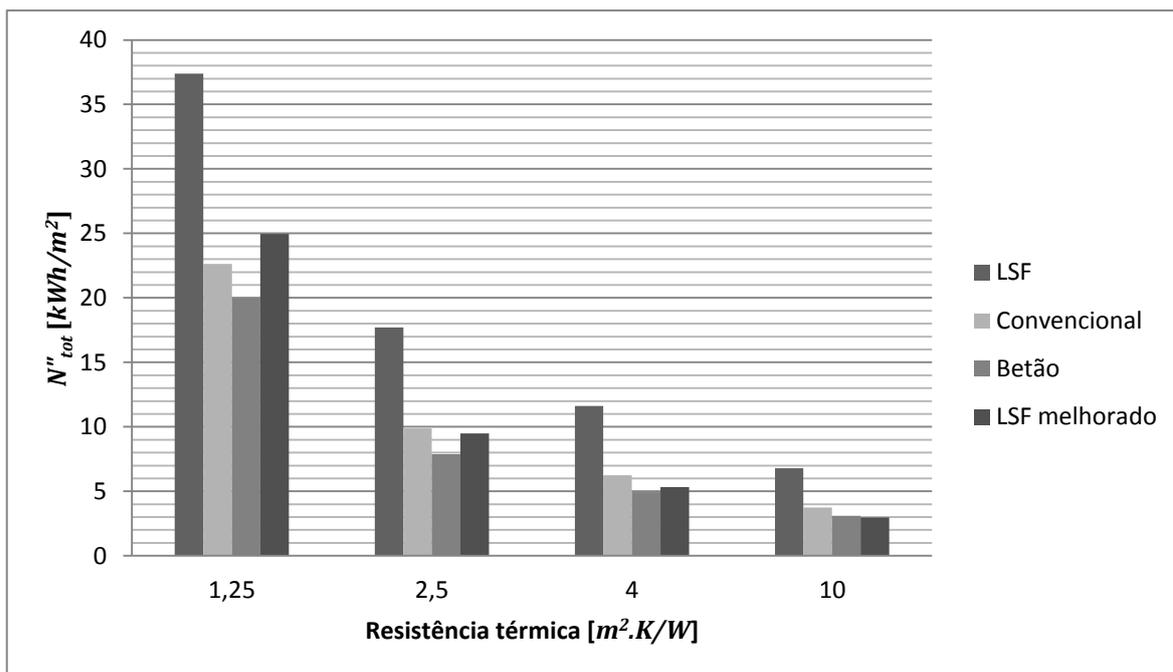


Figura 23 - Representação gráfica das necessidades de climatização dos edifícios sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas

Salienta-se o facto do edifício LSF melhorado continuar a ter uma fraca inércia térmica, considerando o valor da massa útil. No entanto, através de um estudo detalhado da eficiência da massa térmica, nomeadamente quanto à localização ideal da mesma, conseguiu-se obter uma solução construtiva capaz de igualar em termos de desempenho energético uma solução de muito forte inércia, cuja construção implica o consumo de uma maior quantidade de recursos energéticos e materiais.

Procedendo à comparação entre o edifício LSF melhorado e edifício convencional, apresentam-se as diferenças percentuais entre as necessidades de climatização dos dois edifícios:

Tabela 55 – Diferença percentual entre as necessidades de climatização anuais do edifício LSF melhorado e convencional quando sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas

R'' [$m^2.K/W$]	% $_{tot}$ LSF melhorado Vs.Convencional
1,25	10,37
2,5	-3,92
4	-14,67
10	-20,75

3.4.2.2 Edifícios com cargas térmicas internas relevantes

Nas tabelas abaixo apresentam-se as necessidades de climatização anuais dos quatro modelos construtivos quando sujeitos a cargas térmicas internas relevantes, para todos os valores de resistência térmica da envolvente.

Tabela 56 - Necessidades de climatização do edifício LSF sujeito a cargas térmicas internas relevantes para cada valor de resistência térmica

R'' [$m^2 \cdot K/W$]	N''_{arr} [kWh/m^2]	N''_{aq} [kWh/m^2]	N''_{tot} [kWh/m^2]
1,25	32,10	14,49	46,59
2,5	28,42	6,01	34,43
4	27,27	3,25	30,53
10	26,12	1,11	27,22

Tabela 57 - Necessidades de climatização do edifício convencional sujeito a cargas térmicas internas relevantes para cada valor de resistência térmica

R'' [$m^2 \cdot K/W$]	N''_{arr} [kWh/m^2]	N''_{aq} [kWh/m^2]	N''_{tot} [kWh/m^2]
1,25	27,44	4,39	31,83
2,5	25,20	0,67	25,87
4	24,27	0,12	24,39
10	23,27	0,00	23,27

Tabela 58 - Necessidades de climatização do edifício de betão armado sujeito a cargas térmicas internas relevantes para cada valor de resistência térmica

R'' [$m^2 \cdot K/W$]	N''_{arr} [kWh/m^2]	N''_{aq} [kWh/m^2]	N''_{tot} [kWh/m^2]
1,25	26,55	3,30	29,85
2,5	24,44	0,24	24,68
4	23,56	0,03	23,59
10	22,56	0,00	22,56

Tabela 59 - Necessidades de climatização do edifício LSF melhorado sujeito a cargas térmicas internas reduzidas para cada valor de resistência térmica

R'' [$m^2 \cdot K/W$]	N''_{arr} [kWh/m^2]	N''_{aq} [kWh/m^2]	N''_{tot} [kWh/m^2]
1,25	24,32	5,43	29,74
2,5	22,95	0,67	23,62
4	22,54	0,07	22,61
10	22,07	0,00	22,07

Na figura 32 as necessidades de climatização dos quatro edifícios são agrupadas para cada valor comum de resistência térmica.

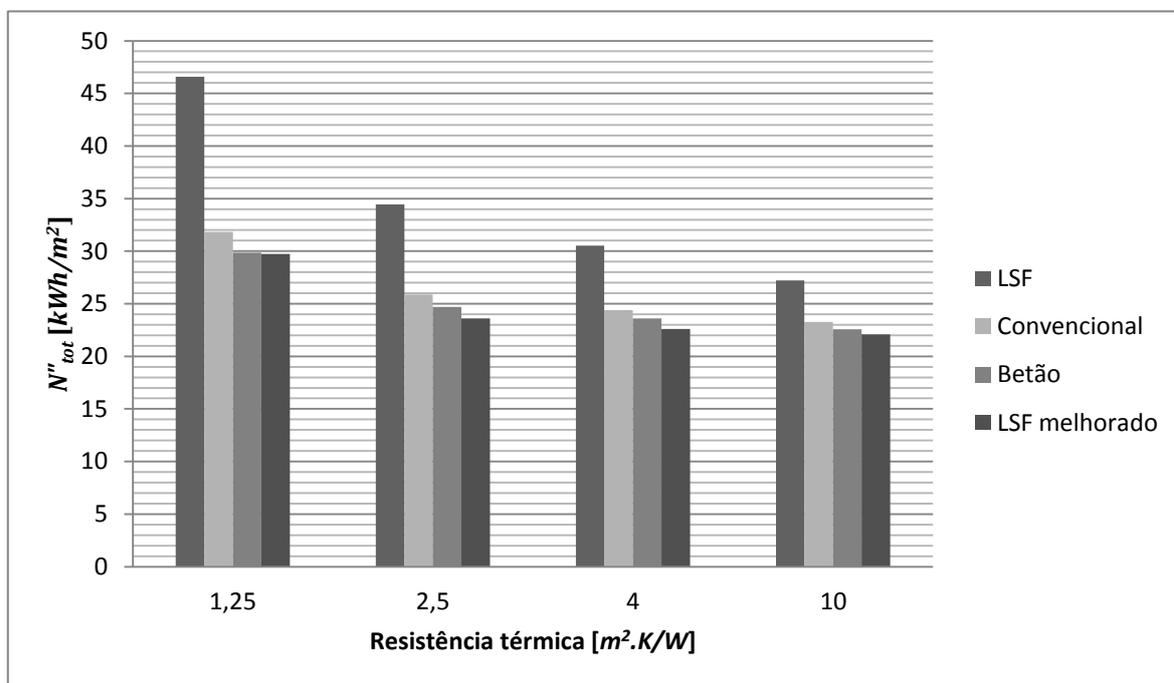


Figura 24 - Representação gráfica das necessidades de climatização dos edifícios sujeitos a cargas térmicas internas relevantes

Sob condições de elevadas cargas térmicas internas, o edifício LSF melhorado apresenta-se como a solução mais eficaz para qualquer nível de isolamento.

Os fortes ganhos internos desempenham um papel fundamental no balanço térmico do edifício, sendo responsáveis por grande parte das necessidades de climatização (arrefecimento). Assim, a massa térmica das paredes interiores tem uma importância muito relevante no comportamento térmico do edifício, mostrando-se evidentes as conclusões retiradas no subcapítulo 3.3, quando foi comprovado que o benefício no aumento de massa térmica nas paredes interiores nestas condições de ganhos internos é o mais elevado. No entanto, se se incrementasse a massa térmica para além dos $21cm_{eb}$ definidos, não se verificaria uma redução significativa nas necessidades de climatização, revelando a estagnação do P_{pi} para valores elevados de massa térmica.

Destaca-se a pouca relevância que a massa térmica incluída nos elementos da envolvente exterior tem no comportamento térmico do edifício, tendo o edifício mais eficaz neste caso de estudo paredes exteriores e cobertura 16 vezes mais leves do que o segundo edifício com melhor desempenho, o de betão armado. Incluindo as paredes interiores, perfazendo o total dos elementos construtivos (excluindo o pavimento), o edifício LSF melhorado é 9 vezes mais leve do que o edifício de betão e 5 vezes mais leve do que o edifício convencional.

Procedendo à comparação entre o edifício LSF melhorado e edifício convencional, apresentam-se as diferenças percentuais entre as necessidades de climatização dos dois edifícios:

Tabela 60 - Diferença percentual entre as necessidades de climatização anuais do edifício LSF melhorado e convencional quando sujeitos a cargas térmicas internas relevantes

R'' [$m^2 \cdot K/W$]	% <i>tot</i> LSF melhorado Vs.Convencional
1,25	-6,55
2,5	-8,72
4	-7,29
10	-5,14

3.4.3 Considerações sobre os PCM's

Os PCM's foram alvo de uma extensa revisão bibliográfica, sendo materiais com um enorme potencial latente de armazenamento térmico.

No entanto, os objetivos propostos para este capítulo foram cumpridos incrementando massa térmica sensível nos elementos construtivos, e a estratégia dos PCM's poderia ser um complemento ao trabalho efetuado até aqui.

A complexidade no dimensionamento dos PCM's quanto à temperatura de fusão e condutividade térmica ideal destes materiais, criando novas variáveis de estudo, necessita de uma outra abordagem. A quantificação de massa térmica latente difere daquela enunciada pela densidade energética, massa e espessura equivalente de betão, não se conseguindo, com a mesma facilidade, converter unidades base em unidades equivalentes devido à temperatura constante a que a mudança de fase se dá, existindo uma incompatibilidade entre as unidades das grandezas que caracterizam a massa térmica – calor específico [$J/(kg \cdot K)$] e calor latente [J/kg].

Outro facto que levou à não consideração dos PCM's como material de massa térmica, prende-se com o processo de simulação dinâmica. Pela natureza dinâmica dos PCM's, cujas propriedades termofísicas variam com a temperatura e conseqüente mudança de fase, o *DesignBuilder/EnergyPlus* obriga a que seja selecionado o método das Diferenças Finitas em vez do típico método *Conduction Transfer Function*.

Para além do método das diferenças finitas ser consideravelmente mais moroso no processamento da simulação, introduzir os PCM's neste trabalho obrigaria a uma repetição completa de todas as simulações realizadas, desta feita com o método de cálculo a que os PCM's obrigam. Todos os resultados apresentados tornar-se-iam obsoletos uma vez que se os mesmos modelos fossem simulados usando as Diferenças Finitas, os resultados seriam outros, e tendo isso em conta é óbvia a necessidade da uniformização dos modelos

simulados quanto ao método de cálculo escolhido, de modo a tornar a comparação entre edifícios fidedigna.

3.5 Síntese do capítulo

Neste capítulo foi estudado o benefício da inércia térmica na redução das necessidades de climatização anuais em edifícios sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas e relevantes, para diferentes níveis de isolamento.

Dividindo o capítulo em duas partes, na primeira realizou-se uma experiência, recorrendo a modelos construtivos simplificados, que consistiu na incorporação de massa térmica (betão genérico), individualmente, nos diferentes elementos construtivos – paredes exteriores, cobertura e paredes interiores - com o objetivo de concluir onde é mais eficaz aumentar a massa do edifício.

Verificou-se que é nas paredes interiores onde os resultados são mais positivos e promissores, sendo que um determinado incremento de massa térmica nas paredes interiores resulta numa maior redução das necessidades de climatização quando comparado com o mesmo incremento em quaisquer outros elementos construtivos, para qualquer nível de isolamento e condição de cargas térmicas internas.

O potencial de poupança pela inércia térmica (Ppi) é tanto maior quanto menor for a resistência térmica da envolvente exterior e é mais evidente quando adicionada massa térmica a elementos construtivos leves/médios num edifício sujeito a fortes cargas térmicas internas.

Na segunda parte do capítulo, sugeriu-se uma estratégia de otimização do comportamento térmico do edifício LSF, com base nos conhecimentos reunidos da experiência anterior.

Selecionou-se a água como material de massa térmica pelas suas características termofísicas, que permitem armazenar uma grande quantidade de calor sob a forma sensível, e incorporou-se a massa térmica dentro das paredes interiores com o objetivo de reduzir as necessidades de climatização anuais que se mostravam – no edifício LSF original - consideravelmente superiores às daquelas do edifício convencional, para os mesmos níveis de isolamento e para as duas condições de ganhos internos.

Foi incluído na análise um edifício de betão armado de muito forte inércia térmica, completando o leque de soluções construtivas apresentadas.

Apenas para um nível fraco de isolamento térmico é que o edifício LSF melhorado não superou o comportamento térmico do edifício convencional quando sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas. À medida que se aumenta a resistência térmica da envolvente exterior, o edifício LSF melhorado tende a aumentar a sua eficácia quando comparado com o edifício convencional e de betão armado, sendo que para um coeficiente de transmissão

térmica de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, as necessidades de climatização são 20% inferiores às do edifício convencional e marginalmente inferiores às do edifício de betão.

Sob condições de fortes ganhos internos, o edifício LSF melhorado mostra-se sempre superior quando termicamente comparado com qualquer outro modelo construtivo e para todos os níveis de isolamento.

4 Análise Energética e Económica

4.1 Sumário

Capítulo onde será realizada uma análise energética e económica do edifício LSF e convencional para condições de cargas térmicas internas reduzidas e relevantes.

Em ambos os modelos construtivos serão aplicadas estratégias de melhoramento térmico, e será calculado o custo de investimento e custo operacional acumulado de cada solução construtiva.

Os resultados em termos de necessidades/consumos energéticos de climatização e custo final – investimento e custo operacional acumulado – serão agrupados de modo a descobrir quais as soluções construtivas de custo mínimo, quais as soluções ótimas, e qual o método construtivo mais eficiente do ponto de vista energético e económico.

4.2 Metodologia de análise e principais pressupostos

4.2.1 Fatores económicos e energéticos

Foi definido um período de 20 anos para a análise económica e energética do edifício, durante os quais se considerou um consumo anual constante que é multiplicado pelo preço da energia. Esse é atualizado anualmente por taxas de inflação e de atualização de capital, sendo o somatório de cada custo operacional anual ao longo dos 20 anos, o custo operacional acumulado. Da soma desse valor com custo de investimento da solução construtiva, resulta o custo final do edifício.

O indicador económico que serve para definir o custo final do edifício é o Valor Atual Líquido (VAL), cuja formulação adaptada para esta análise é a seguinte:

$$C_f = I_0 + \sum_{i=0}^N c_a \cdot C_{e_0} \cdot \frac{(1+t)^i}{(1+d)^i} \quad [\text{eq. 12}]$$

Sendo:

C_f o custo final do edifício,

I_0 o investimento inicial (ano 0) na construção do edifício,

c_a o consumo energético anual ou consumo operacional- constante,

i o ano presente

N o número de anos a considerar na análise (20),

C_{e_0} o custo da energia no ano 0 – constante,

t a inflação do preço da energia,

d a taxa de atualização de capital,

$C_{e_0} \cdot \frac{(1+t)^i}{(1+d)^i}$ o preço da energia no ano i ,

$\sum_{i=0}^N c_a \cdot C_{e0} \cdot \frac{(1+t)^i}{(1+d)^i}$ o custo operacional acumulado.

O C_f contabiliza o custo de investimento e o custo operacional acumulado de uma determinada solução construtiva. Para se obter o VAL é apenas necessário subtrair o custo final de um edifício base pelo custo final do edifício em estudo.

O investimento inicial (I_0) e o custo operacional acumulado ($\sum_{i=0}^N c_a \cdot C_{e0} \cdot \frac{(1+t)^i}{(1+d)^i}$) quando em função do consumo energético anual da respetiva solução construtiva, definem a curva de investimento – que tende a aumentar potencialmente com a diminuição dos consumos energéticos – e a reta de custo operacional acumulado – que aumenta proporcionalmente ao consumo energético, pelo declive $C_{e0} \cdot \sum_{i=0}^N \frac{(1+t)^i}{(1+d)^i}$.

Considerou-se que $C_{e0} = 0,20 \text{ €/kWh}$, fazendo-se uma aproximação entre o custo do kWh para um tarifário normal, acrescentando-lhe o IVA e outras taxas (potência contratada, etc.).

Admite-se a enorme incerteza implícita numa análise em 20 anos, sendo que a imprevisibilidade dos agentes económicos é demasiada para ser prevista com um grau aceitável de certeza. No entanto, criou-se um cenário mais ou menos realista e recessivo em que o preço da energia inflaciona a 5% ao ano, sendo a taxa de atualização de capital de 2% ao ano.

Esta situação em que a inflação é superior à taxa de atualização de capital é invulgar, sendo que, tipicamente, a atualização do capital cobre, no mínimo, o valor da inflação à qual se acresce uma taxa líquida de remuneração. Neste caso, os 5% considerados tratam-se de uma inflação particular da energia, que contribuindo para a inflação global sentida na economia, não representa o valor da inflação global, que é ponderado com todos os bens e serviços dos diversos setores de atividade económica. Assim, considere-se que a inflação global é de 1,5% (existindo setores inflacionados a uma taxa consideravelmente inferior a este número) e a taxa líquida de remuneração de capital de 0,5%; assim os valores apresentados - 2% de atualização de capital e 5% de aumento do custo da energia - fazem sentido numa perspetiva global.

Efetuar-se-á uma análise de sensibilidade às taxas assumidas, de modo a perceber quão fortes e independentes são as conclusões, quanto ao melhor método construtivo energética e economicamente, face à variação de parâmetros económicos.

4.2.2 Custo de investimento

O custo das soluções construtivas tem por base a contabilização das fundações, estrutura, fachadas, cobertura, pavimento e paredes de compartimentação interior. Excluíram-se da análise todo um conjunto que se considera irrelevante para o problema, quer por apresentarem o mesmo custo em ambos os métodos construtivos (LSF e

convencional), ou porque em nada contribuem para o desempenho energético do edifício. No entanto, representam um custo real e necessário na construção de um edifício, como tal o investimento calculado não pode coincidir com nenhum preço de mercado. Desse conjunto excluído inserem-se: revestimentos, equipamentos e componentes (móvel) interiores, caixilharias, envidraçados, portas e instalações técnicas.

O custo das soluções construtivas foi calculado com recurso à ferramenta de orçamentação Gerador de Preços, da Cype, SA© (65) e com a ajuda de profissionais na área da construção civil, pela empresa Betonit, LDA.

Admite-se alguma subjetividade nos preços usados nesta análise, principalmente por não ter sido possível (por falta de opções construtivas na base de dados do Gerador de Preços) utilizar uma fonte única de consulta. Para além disso, o custo de um edifício varia consoante a empresa que o constrói pela capacidade de execução, margens de lucro, acordos com outras empresas, etc.

4.2.3 Consumo energético

Apenas as necessidades/consumos de climatização (sinónimos, uma vez que o sistema que suprime as necessidades de aquecimento e arrefecimento tem um rendimento de 100%) são contabilizados no consumo energético anual, ou consumo operacional. Desta forma simplifica-se a metodologia, focando a análise no comportamento térmico do edifício, que tem sido uma constante ao longo de todo o trabalho, mas agora considerando as implicações em termos económicos subjacentes às diferentes soluções construtivas.

4.2.4 Caracterização das soluções construtivas

As soluções construtivas simuladas, que compõem a curva de investimento e de custo operacional acumulado, resultam da variação da quantidade isolamento e massa térmica; equipamentos, perfis, sistema AVAC e toda a panóplia de materiais construtivos definidos anteriormente e com implicações diretas nas necessidades/consumos de climatização, serão mantidos como constante durante a análise do problema.

No edifício LSF consideraram-se três espessuras de massa térmica (água)^P na envolvente exterior vertical e paredes interiores - 0cm, 10cm e 15cm. A solução com 0cm

^P As paredes de água são o único elemento cujo preço não foi calculado ou estimado pelo Gerador de Preços ou pela Betonit. Tendo a água da rede pública um custo irrisório ($\cong 1\text{€}/m^3$) quando comparado com materiais construtivos convencionais, compensou-se esse valor com um custo (provavelmente) sobredimensionado do reservatório que contém a água dentro das paredes, garantindo que os resultados económicos não são forçados para a solução que está a ser defendida. Foi também ponderado o custo de mão-de-obra associado ao enchimento das paredes: com um caudal médio de uma torneira convencional, calculou-se o tempo que o reservatório demora a encher e é esse período em que os trabalhadores são pagos. Definiu-se que o reservatório custa $250\text{€}/m^3$ e que os trabalhadores são pagos a $20\text{€}/h$.

de massa térmica nas paredes interiores apresenta 7cm de lã de rocha entre os painéis cimentícios.

No edifício convencional consideraram-se três espessuras de tijolo cerâmico nas paredes exteriores - 15cm, 20cm e 30cm (dupla camada de alvenaria com isolamento térmico no interior) – e três espessuras de betão armado na cobertura - 15cm, 20cm e 30cm. As soluções apresentadas para a envolvente exterior foram combinadas aos pares: 15→15; 20→20; 30→30. Nas paredes interiores definiu-se a mesma estratégia que no edifício LSF, usando tijolo cerâmico em vez de água.

Foram definidos os mesmos 4 níveis de isolamento considerados até aqui, com coeficientes de transmissão térmica da envolvente exterior de 0,8; 0,4; 0,25 e 0,1 W/(m².K) para ambos os métodos construtivos.

A principal razão para não se ter adicionado massa térmica na cobertura dos modelos LSF, prende-se com a incerteza da integridade estrutural do conjunto caso a cobertura seja sujeita a uma elevada carga estrutural. Não sendo parte dos objetivos deste trabalho dimensionar estruturalmente o edifício, e existindo o risco da estrutura da cobertura considerada não ser capaz de suportar o peso da água, optou-se por não se adicionar massa térmica neste elemento construtivo, evitando apresentar soluções de execução inviável. Este problema não existe nos elementos verticais, uma vez que a massa se encontra apoiada ao nível do solo, não estando suspensa sobre os perfis metálicos.

No total, simularam-se 36 soluções (4x3x3) para cada método construtivo.

Tabela 61 - Representação simplificada das combinações construtivas definidas para o edifício LSF

R'' [m ² .K/W]	Espessura de água (paredes exteriores) [cm]	Espessura de água (paredes interiores) [cm]
1,25	0	0
2,5	10	10
4	15	15
10		

É importante referir que as opções de massa térmica não são de valor equivalente no edifício LSF e convencional, sendo apenas comparáveis no contexto construtivo que caracteriza os dois métodos construtivos distintos. Aquilo que é considerado “leve”, “médio” e “pesado” em relação aos elementos construtivos difere no tipo e espessura de material, caso se trate do edifício LSF e convencional. Assim, as espessuras selecionadas respeitam paradigmas construtivos em vez de representarem valores coincidentes de massa térmica.

Tabela 62 - Representação simplificada das combinações construtivas definidas para o edifício convencional

R'' [m ² .K/W]	Espessura de tijolo cerâmico/betão armado (paredes exteriores/cobertura) [cm]	Espessura de tijolo cerâmico (paredes interiores) [cm]
1,25	15/15	0
2,5	20/20	10
4	30/30	15
10		

Nas seguintes tabelas apresentam-se as massas térmicas referentes a cada espessura de elemento construtivo. No edifício LSF, qualquer combinação de espessuras resulta numa massa térmica total do edifício inferior à combinação semelhante no edifício convencional.

Tabela 63 – Massa térmica referente a cada espessura de elemento construtivo no edifício LSF

Paredes exteriores		Paredes interiores	
Espessura do elemento construtivo [cm]	Massa térmica – água [kgeb]	Espessura do elemento construtivo [cm]	Massa térmica – água [kgeb]
0	0	0	0
10	503,81	10	282,70
15	755,71	15	424,05

Tabela 64 - Massa térmica referente a cada espessura de elemento construtivo no edifício convencional

Paredes exteriores/cobertura		Paredes interiores	
Espessura dos elementos construtivos [cm]	Massa térmica – tijolo cerâmico/betão armado [kgeb]	Espessura do elemento construtivo [cm]	Massa térmica – tijolo cerâmico [kgeb]
15/15	622,69	0	0
20/20	830,26	10	108,82
30/30	1245,39	15	163,22

4.2.5 Análise comparativa

O objetivo principal da análise energética e económica é descobrir qual o método construtivo mais eficaz nas duas vertentes. Pretende-se encontrar quais as soluções construtivas que resultam em menores consumos energéticos para custos de investimento comeditos.

De modo a simplificar a interpretação dos resultados e para que sejam indicadas, de forma imediata, quais as melhores soluções construtivas, toda a análise energética e

económica é feita numa base comparativa, sem que sejam estudados os custos absolutos das soluções em termos de investimento e custo operacional acumulado.

Em vez de se analisarem os custos absolutos, subtraem-se os sobrecustos de cada solução relativamente ao edifício de menor custo de investimento à poupança verificada em 20 anos de consumos energéticos em relação a esse mesmo edifício (que pode ser negativa, caso exista uma solução mais cara e com um pior comportamento térmico). O que equivale à subtração do custo final do edifício de menor investimento com o custo final de cada solução construtiva em estudo.

A operação acima descrita representa o VAL, e caso o resultado desta operação seja negativo, o edifício em questão apresenta um prejuízo após os 20 anos de utilização, uma vez que a poupança (caso se verifique) pelos consumos energéticos mais reduzidos não compensa o sobrecusto de investimento inicial em relação à solução de menor custo. Analogamente, quanto mais positivo for o VAL melhor é a solução construtiva, sendo o valor máximo respetivo à solução de custo ótimo. Tendencialmente, quanto menores são os consumos energéticos, maior o sobrecusto da estratégia a aplicar ao edifício, e a solução de custo ótimo é a conjugação ideal entre investimento e consumos. Os edifícios mais baratos (em relação à solução ótima) que consomem mais, e os edifícios mais caros que consomem menos, não apresentam um VAL tão elevado.

Interessa que essa solução ótima apresente o consumo energético anual mais reduzido possível, sendo que quanto menor for esse consumo, melhor é a solução do ponto de vista energético.

Por fim, traça-se uma curva de custo ótimo que une todas as soluções que maximizam o VAL.

Esta metodologia comparativa é adotada não só no estudo das soluções dentro do mesmo método construtivo, mas também aquando da comparação entre o edifício LSF e o edifício convencional. Desta forma é possível determinar qual o método construtivo com um maior número de soluções em cima da curva de custo ótimo, dando a indicação direta do melhor método construtivo numa ótica económica.

4.3 Análise energética e económica simplificada do edifício LSF e convencional

4.3.1 Edifícios com cargas térmicas internas reduzidas

LSF

Na tabela abaixo apresentam-se os resultados que permitem efetuar a análise energética económica das 36 soluções construtivas LSF testadas.

A nomenclatura escolhida para representar as soluções construtivas de forma simplificada, por exemplo: em *0,8-1-1*, o 0,8 é referente ao coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior, o primeiro “1” designa a opção mais leve aplicada nas paredes exteriores e o segundo “1” refere-se à opção mais leve aplicada nas paredes interiores. O primeiro termo pode assumir os valores de 0,8; 0,4; 0,25 e 0,1 e o segundo e terceiro termo as letras “l” (leve); “m” (médio); “p” (pesado) - (respetivas espessuras do material na tabela 61).

De referir que esta nomenclatura que define cada solução construtiva é válida quer para o edifício LSF quer para o edifício convencional, apesar de não se tratarem das mesmas soluções, como já explicado em 4.2.4. O coeficiente de transmissão térmica é o único termo de cariz absoluto, enquanto as referências “l”, “m” e “p” são relativas às soluções apresentadas na tabela 62, não indicando de forma direta a massa da solução em estudo, mas apenas se se trata da opção mais leve, média ou mais pesada daquelas disponíveis e que tentam caracterizar opções típicas na construção de um edifício real.

A tabela mostra o consumo energético anual, investimento inicial, custo operacional acumulado e custo final de cada solução construtiva. E ainda o sobrecurso (SC), poupança no consumo energético (PCE) e o VAL, que representam, respetivamente: a diferença do investimento inicial entre qualquer solução a aquela da menor custo de investimento; a diferença entre o custo operacional acumulado da solução de menor investimento e o custo operacional acumulado de qualquer outra solução construtiva; e a diferença entre custo final do edifício de menor investimento e o custo final de qualquer outra solução em estudo.

O VAL é o indicador mais importante nesta análise, sendo que quanto maior for o valor melhor é a solução construtiva em termos económicos; e tanto melhor energeticamente quanto menor for o consumo anual respetivo dessa solução.

Tabela 65 – Soluções construtivas LSF sujeitas a cargas térmicas internas reduzidas e respetivos indicadores energéticos e económicos

Solução	C_a [kWh/ m ²]	I_0 [€/m ²]	$\sum_{i=0}^N c_a \cdot c_{e0} \cdot \frac{(1+t)^i}{(1+d)^i}$ [€/m ²]	C_f [€/m ²]	SC [€/m ²]	PCE [€/m ²]	VAL [€/m ²]
0,8-l-l	37,39	383,44	199,75	583,19	0,00	0,00	0,00
0,8-l-m	24,97	384,00	133,39	517,39	0,56	66,36	65,80
0,8-l-p	23,27	395,84	124,31	520,15	12,40	75,45	63,05
0,8-m-l	30,74	425,64	164,19	589,84	42,20	35,56	-6,64
0,8-m-m	22,79	426,20	121,74	547,95	42,76	78,01	35,25
0,8-m-p	21,14	438,05	112,95	551,00	54,61	86,80	32,20
0,8-p-l	30,18	446,75	161,20	607,94	63,31	38,56	-24,75
0,8-p-m	22,43	447,31	119,85	567,16	63,87	79,91	16,04
0,8-p-p	20,82	459,15	111,20	570,35	75,71	88,55	12,85
0,4-l-l	17,70	397,74	94,53	492,27	14,30	105,22	90,92
0,4-l-m	9,49	398,30	50,72	449,02	14,86	149,04	134,18
0,4-l-p	8,19	410,14	43,75	453,89	26,70	156,01	129,31
0,4-m-l	14,35	439,94	76,63	516,58	56,50	123,12	66,62
0,4-m-m	8,24	440,50	44,02	484,52	57,06	155,74	98,67
0,4-m-p	7,08	452,35	37,81	490,16	68,91	161,94	93,04
0,4-p-l	12,25	461,05	65,42	526,47	77,61	134,33	56,73
0,4-p-m	7,88	461,61	42,10	503,71	78,17	157,65	79,48
0,4-p-p	6,81	473,45	36,40	509,85	90,01	163,36	73,35
0,25-l-l	11,63	410,13	62,12	472,26	26,69	137,63	110,94
0,25-l-m	5,32	410,69	28,42	439,11	27,25	171,34	144,08
0,25-l-p	4,50	422,54	24,05	446,58	39,10	175,71	136,61
0,25-m-l	9,22	452,34	49,27	501,61	68,90	150,49	81,59
0,25-m-m	4,62	452,90	24,68	477,58	69,46	175,07	105,61
0,25-m-p	3,89	464,74	20,80	485,54	81,30	178,95	97,65
0,25-p-l	8,81	473,44	47,04	520,48	90,00	152,71	62,71
0,25-p-m	4,42	474,00	23,60	497,60	90,56	176,15	85,59
0,25-p-p	3,68	485,84	19,67	505,52	102,40	180,08	77,68
0,1-l-l	6,79	460,16	36,27	496,43	76,72	163,48	86,76
0,1-l-m	2,97	460,72	15,87	476,59	77,28	183,89	106,60
0,1-l-p	2,54	472,56	13,58	486,15	89,12	186,17	97,05
0,1-m-l	5,29	502,37	28,27	530,63	118,93	171,49	52,56
0,1-m-m	2,66	502,93	14,22	517,14	119,49	185,54	66,05
0,1-m-p	2,31	514,77	12,34	527,11	131,33	187,41	56,09
0,1-p-l	5,00	523,47	26,72	550,18	140,03	173,04	33,01
0,1-p-m	2,57	524,03	13,75	537,78	140,59	186,00	45,41
0,1-p-p	2,24	535,87	11,95	547,82	152,43	187,81	35,38

Dispondo o VAL em função do consumo energético de cada solução construtiva, na figura 33:

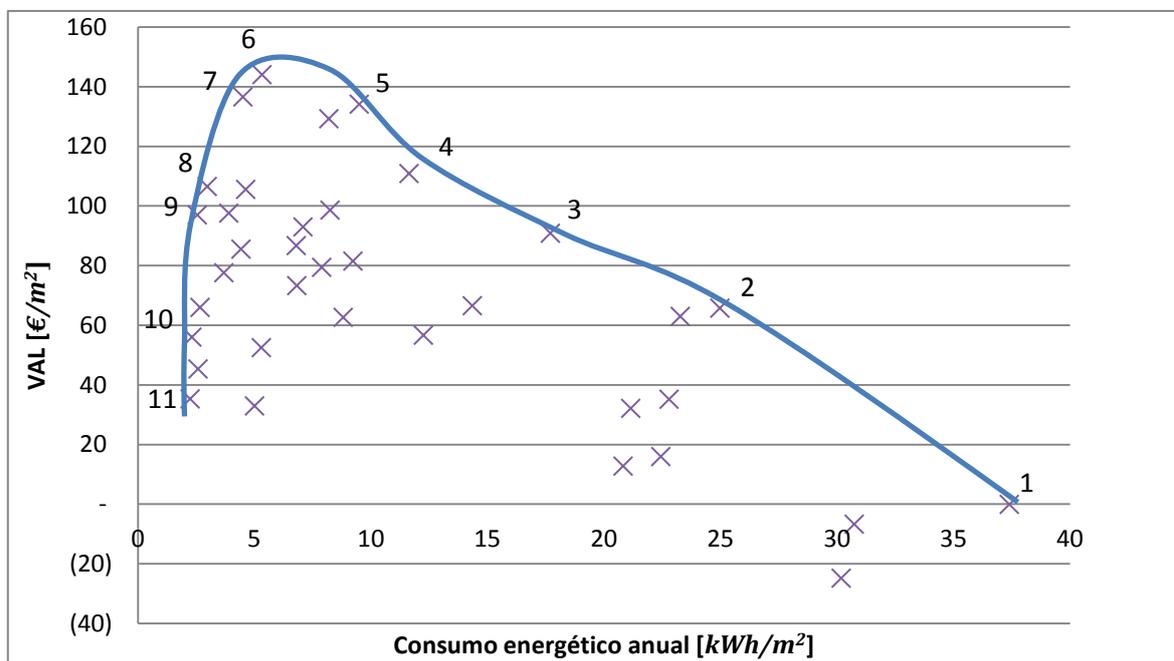


Figura 25 – Representação gráfica do VAL de cada solução construtiva LSF, sujeita a cargas térmicas internas reduzidas, em função dos consumos energéticos anuais

A curva que maximiza o VAL representa-se por 11 soluções construtivas:

1: 0,8-l-l;

Coefficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 cm de água e paredes interiores com 0 cm de água.

2: 0,8-l-m;

Coefficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 cm de água e paredes interiores com 10 cm de água.

3: 0,4-l-l;

Coefficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 cm de água e paredes interiores com 0 cm de água.

4: 0,25-l-l;

Coefficiente de transmissão térmica de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 cm de água e paredes interiores com 0 cm de água.

5: 0,4-l-m;

Coefficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 cm de água e paredes interiores com 10 cm de água.

6: 0,25-l-m;

Coefficiente de transmissão térmica de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 cm de água e paredes interiores com 10 cm de água.

7: 0,25-l-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 0 *cm* de água e paredes interiores com 15 *cm* de água.

8: 0,1-l-m;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 0 *cm* de água e paredes interiores com 10 *cm* de água.

9: 0,1-l-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 0 *cm* de água e paredes interiores com 15 *cm* de água.

10: 0,1-m-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 10 *cm* de água e paredes interiores com 15 *cm* de água.

11: 0,1-p-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 15 *cm* de água e paredes interiores com 15 *cm* de água.

Observa-se que é no aumento de isolamento e massa térmica nas paredes interiores que se obtêm melhores resultados a nível energético e económico, uma vez que na maioria das soluções de melhor benefício, as paredes exteriores caracterizam-se pela opção mais leve.

A solução construtiva ótima é representada pelo ponto 6. O edifício tem um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 0 *cm* de água e paredes interiores com 10 *cm* de água.

O consumo energético anual é de $5,32 kWh/m^2$ e o VAL de $144,08 €/m^2$, o que, dividindo pelos 20 anos de atividade, equivale a uma poupança anual de $7,20 €/m^2$.

Convencional

Procedendo à mesma análise das soluções construtivas convencionais, mas remetendo para o Anexo IV a tabela com os respetivos indicadores energéticos e económicos.

Dispondo o VAL em função do consumo energético de cada solução construtiva, na figura 34:

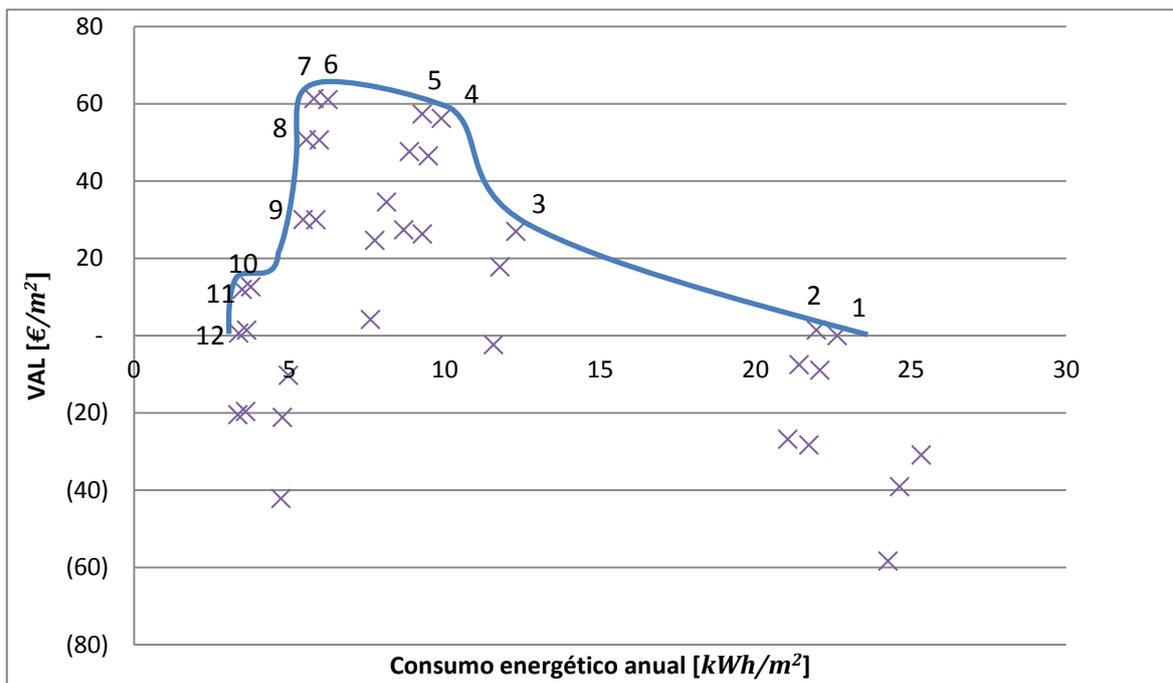


Figura 26 - Representação gráfica do VAL de cada solução construtiva convencional, sujeita a cargas térmicas internas reduzidas, em função dos consumos energéticos anuais

1: 0,8-l-m;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 10 cm de tijolo cerâmico.

2: 0,8-l-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 15 cm de tijolo cerâmico.

3: 0,4-l-l;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 0 cm de tijolo cerâmico.

4: 0,4-l-m;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 10 cm de tijolo cerâmico

5: 0,4-l-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 15 cm de tijolo cerâmico.

6: 0,25-l-m;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 10 cm de tijolo cerâmico.

7: 0,25-l-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 15 cm de tijolo cerâmico.

8: 0,25-m-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$, paredes exteriores com 20 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 20 cm de betão armado e paredes interiores com 15 cm de tijolo cerâmico.

9: 0,25-p-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$, paredes exteriores com 30 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 30 cm de betão armado e paredes interiores com 15 cm de tijolo cerâmico.

10: 0,1-l-m;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2.K)$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 10 cm de tijolo cerâmico.

11: 0,1-l-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2.K)$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 15 cm de tijolo cerâmico.

12: 0,1-m-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,1 W/(m^2.K)$, paredes exteriores com 20 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 20 cm de betão armado e paredes interiores com 15 cm de tijolo cerâmico.

Observa-se que é no aumento de isolamento e massa térmica nas paredes interiores que se obtêm melhores resultados a nível energético e económico, uma vez que na maioria das soluções de melhor benefício a envolvente exterior caracterizam-se pela opção mais leve.

A solução construtiva ótima é representada pelo ponto 7. O edifício tem um coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2.K)$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 15 cm de tijolo cerâmico.

O consumo energético anual é de $5,78 kWh/m^2$ e o VAL de $61,35 €/m^2$, o que, dividindo pelos 20 anos de atividade, equivale a uma poupança anual de $3,07 €/m^2$.

LSF Vs. Convencional

Comparando os dois métodos construtivos quanto à solução ótima, conclui-se que o edifício LSF é superior em termos energéticos, uma vez que o consumo de energia anual da solução de melhor benefício (VAL máximo) é inferior à do edifício convencional ($5,32 \text{ kWh/m}^2$ contra $5,78 \text{ kWh/m}^2$).

Analisando o VAL de cada solução e comparando os resultados referentes aos dois métodos construtivos, verifica-se que o edifício LSF tem uma maior margem de investimento em estratégias de melhoramento térmico, resultando em benefícios económicos mais elevados, pela redução dos consumos energéticos.

Contudo, não existe nenhuma informação que indique diretamente qual o melhor método construtivo para soluções equiparáveis; ou seja, algo que permita concluir se o método LSF é melhor ou pior economicamente em relação ao edifício convencional igualmente isolado e para as várias opções de massa térmica.

Para cada solução construtiva, LSF e convencional, com igual coeficiente de transmissão térmica e níveis de massa térmica equiparáveis (de forma relativa), calculou-se o sobrecusto; a poupança pelo consumo energético e o VAL de cada solução construtiva LSF em relação ao investimento da solução convencional equivalente. Na tabela AIV.2 apresentam-se os resultados para cada solução construtiva, e na figura 35 representa-se graficamente o VAL do edifício LSF em relação ao edifício convencional equivalente, em função de cada solução construtiva.

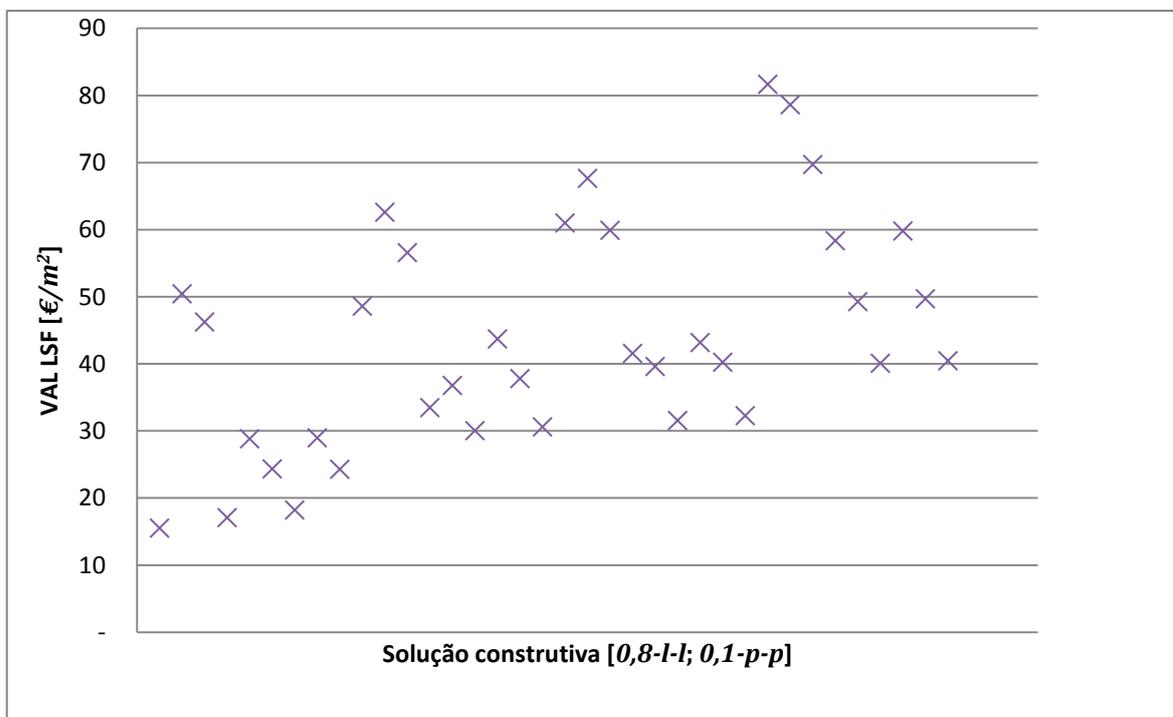


Figura 27 – Disposição gráfica do VAL das soluções LSF face às soluções de “igual categoria” convencionais para os edifícios sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas

Observa-se que existe sempre um VAL positivo nas soluções construtivas LSF, benefício que tende a aumentar à medida que os edifícios se tornam mais eficazes termicamente.

Portanto, o método construtivo LSF faz mais sentido do ponto de vista económico, mostrando-se superior ao método convencional para qualquer nível de isolamento e inércia térmica.

4.3.2 Edifícios com cargas térmicas internas relevantes

Procede-se à mesma metodologia adotada em 4.3.1, mas com modelos construtivos sujeitos a fortes cargas térmicas internas.

As tabelas referentes às soluções construtivas e respetivos indicadores energéticos são remetidas para o Anexo IV.

LSF

Dispondo o VAL em função do consumo energético de cada solução construtiva, na figura 36:

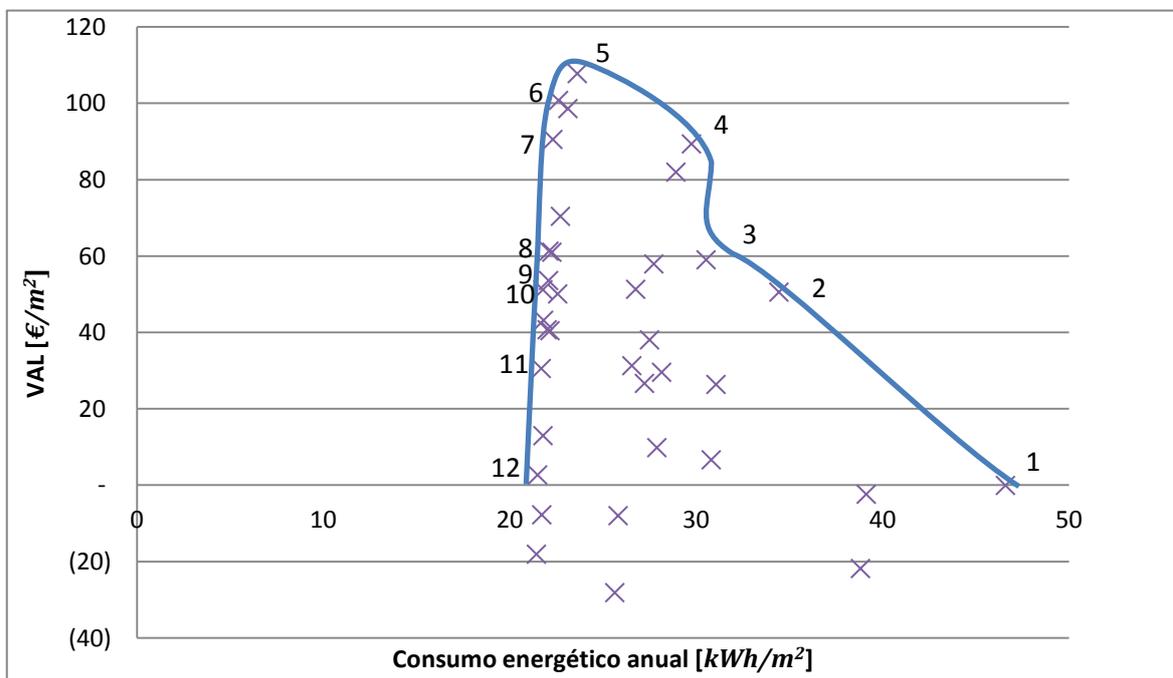


Figura 28 - Representação gráfica do VAL de cada solução construtiva LSF, sujeita a cargas térmicas internas relevantes, em função dos consumos energéticos anuais

1: 0,8-l-l;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 *cm* de água e paredes interiores com 0 *cm* de água.

2: 0,4-l-l;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 *cm* de água e paredes interiores com 0 *cm* de água.

3: 0,25-l-l;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 *cm* de água e paredes interiores com 0 *cm* de água.

4: 0,8-l-m;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 *cm* de água e paredes interiores com 10 *cm* de água.

5: 0,4-l-m;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 *cm* de água e paredes interiores com 10 *cm* de água.

6: 0,25-l-m;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 *cm* de água e paredes interiores com 10 *cm* de água.

7: 0,25-l-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 *cm* de água e paredes interiores com 15 *cm* de água.

8: 0,25-m-m;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 10 *cm* de água e paredes interiores com 10 *cm* de água.

9: 0,1-l-m;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 0 *cm* de água e paredes interiores com 10 *cm* de água.

10: 0,25-m-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 10 *cm* de água e paredes interiores com 15 *cm* de água.

11: 0,25-p-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 15 *cm* de água e paredes interiores com 15 *cm* de água.

12: 0,1-m-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, paredes exteriores com 10 *cm* de água e paredes interiores com 15 *cm* de água.

Observa-se que é no aumento de isolamento e massa térmica nas paredes interiores que se obtêm melhores resultados a nível energético e económico, uma vez que na maioria das soluções de melhor benefício, as paredes exteriores caracterizam-se pela opção mais leve. No entanto, os consumos energéticos anuais atingem valores assintóticos próximos dos

21 kWh/m², não sendo possível reduzir esse valor recorrendo às estratégias de melhoria pelo aumento da resistência e inércia térmica. Assim, todos os pontos à esquerda da solução construtiva ótima contribuem para um declive muito acentuado da curva de melhor benefício, significando uma muita pequena redução nos consumos energéticos para uma perda significativa do VAL (pelo aumento do custo de investimento), e não são bons exemplos de soluções construtivas eficientes apesar de fazerem parte da curva que maximiza o VAL.

A solução construtiva ótima é representada pelo ponto 5. O edifício tem um coeficiente de transmissão térmica de 0,4 W/(m².K), paredes exteriores com 0 cm de água e paredes interiores com 10 cm de água.

O consumo energético anual é de 23,62 kWh/m² e o VAL de 107,85 €/m², o que, dividindo pelos 20 anos de atividade, equivale a uma poupança anual de 5,39 €/m².

Convencional

Procedendo à mesma análise das soluções construtivas convencionais, mas remetendo para o Anexo IV a tabela com os respetivos indicadores energéticos e económicos.

Dispondo o VAL em função do consumo energético de cada solução construtiva, na figura 37:

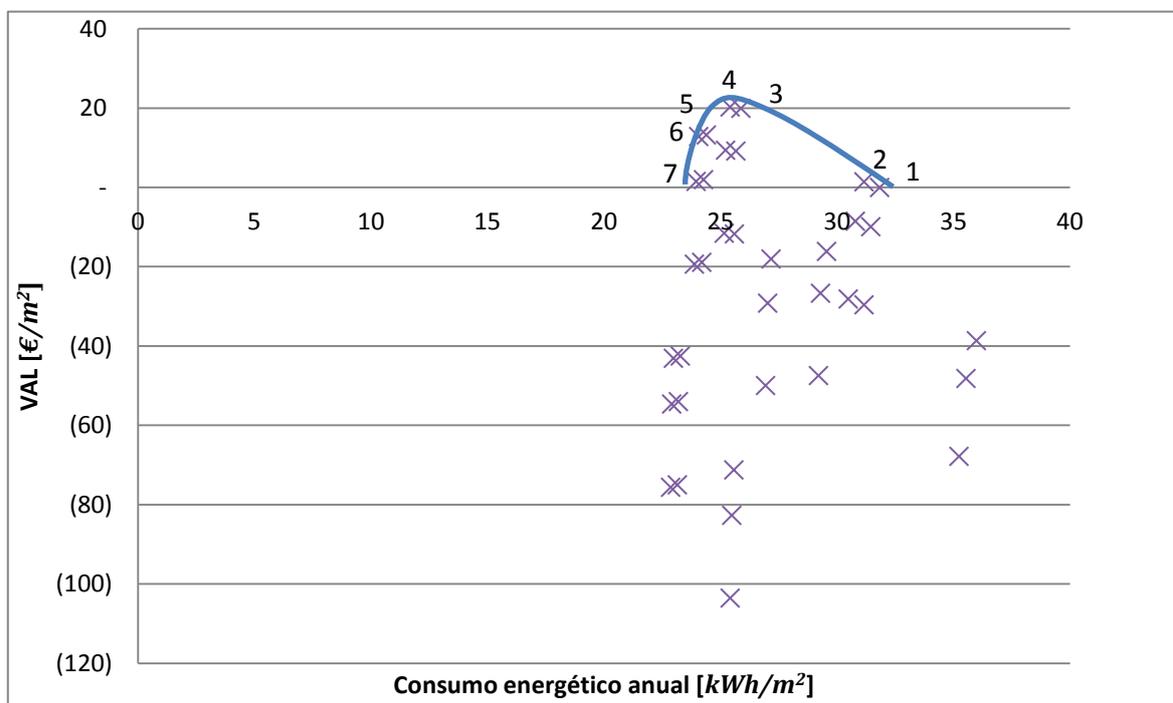


Figura 29 - Representação gráfica do VAL de cada solução construtiva convencional, sujeita a cargas térmicas internas relevantes, em função dos consumos energéticos anuais

1: 0,8-l-m;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,8 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 10 cm de tijolo cerâmico.

2: 0,8-l-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,8 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 15 cm de tijolo cerâmico.

3: 0,4-l-m;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,4 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 10 cm de tijolo cerâmico.

4: 0,4-l-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,4 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 15 cm de tijolo cerâmico.

5: 0,25-l-m;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 10 cm de tijolo cerâmico.

6: 0,25-l-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 15 cm de tijolo cerâmico.

7: 0,25-m-p;

Coeficiente de transmissão térmica de $0,25 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 20 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 20 cm de betão armado e paredes interiores com 15 cm de tijolo cerâmico.

Neste caso de estudo, a maioria das soluções construtivas apresentam um VAL negativo, o que significa que a maioria dos investimentos não é recompensável pela redução dos consumos energéticos ao longo dos 20 anos. No entanto, continua a verificar-se que na maior parte das soluções de melhor benefício a envolvente exterior caracteriza-se pela opção construtiva mais leve, evidenciando, mais uma vez, a eficácia energética e económica de estratégias que aumentam a massa térmica em elementos interiores.

A solução construtiva ótima é representada pelo ponto 4. O edifício tem um coeficiente de transmissão térmica de $0,4 W/(m^2 \cdot K)$, paredes exteriores com 15 cm de tijolo cerâmico, cobertura com 15 cm de betão armado e paredes interiores com 15 cm de tijolo cerâmico.

O consumo energético anual é de $25,41 kWh/m^2$ e o VAL de $20,29 €/m^2$, o que, dividindo pelos 20 anos de atividade, equivale a uma poupança anual de $1,01 €/m^2$.

LSF Vs. Convencional

Comparando os dois métodos construtivos quanto à solução ótima, conclui-se que o edifício LSF é superior em termos energéticos, uma vez que o consumo de energia anual da solução de melhor benefício é inferior à do edifício convencional ($23,62 \text{ kWh/m}^2$ contra $25,41 \text{ kWh/m}^2$).

Analisando o VAL das soluções respetivas aos dois métodos construtivos, verifica-se que o edifício LSF tem uma maior margem de investimento em estratégias de melhoramento térmico, resultando em benefícios económicos mais elevados, pela redução dos consumos energéticos.

Para cada solução construtiva, LSF e convencional, com igual coeficiente de transmissão térmica e níveis de massa térmica equiparáveis (de forma relativa), calculou-se o sobrecusto; a poupança pelo consumo energético e o VAL de cada solução construtiva LSF em relação ao investimento da solução convencional equivalente. Na tabela AIV.5 apresentam-se os resultados para cada solução construtiva, e na figura 38 representa-se graficamente o VAL do edifício LSF em relação ao edifício convencional equivalente, em função de cada solução construtiva.

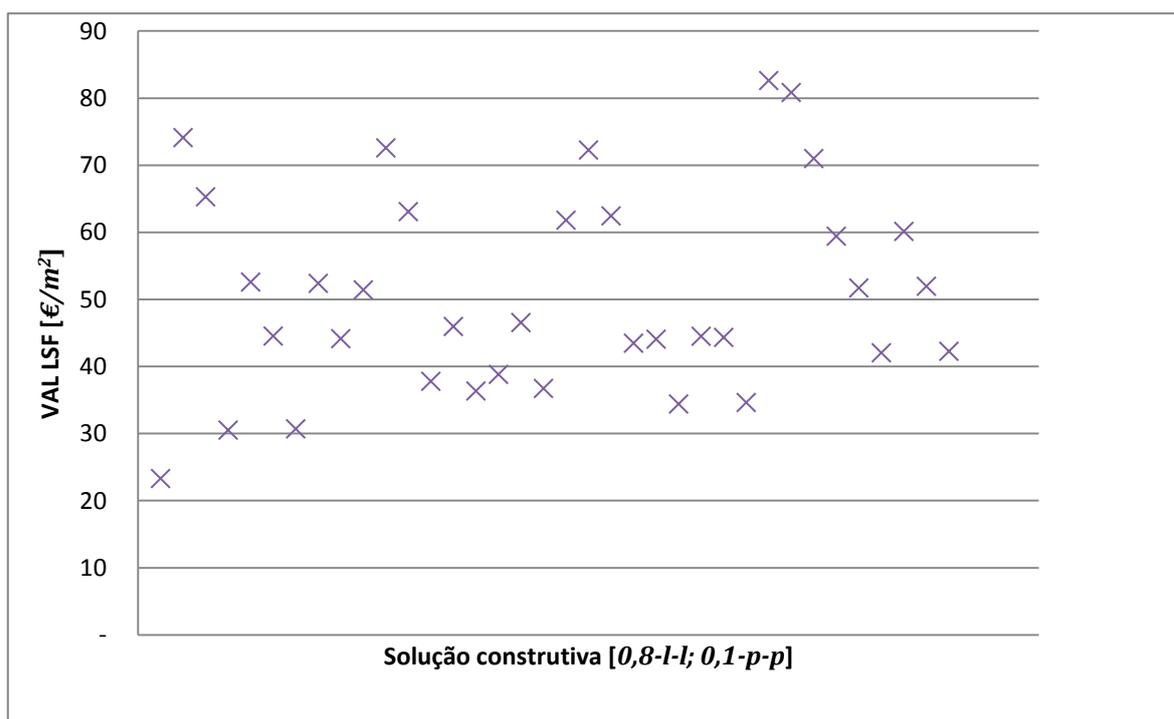


Figura 30 - Disposição gráfica do benefício das soluções LSF face às soluções de "igual categoria" convencionais para os edifícios sujeitos a cargas térmicas internas relevantes

Observa-se que existe sempre um VAL positivo nas soluções construtivas LSF, benefício que tende a aumentar à medida que os edifícios se tornam mais eficazes termicamente.

Portanto, o método construtivo LSF faz mais sentido do ponto de vista económico, mostrando-se superior ao método convencional para qualquer nível de isolamento e inércia térmica.

4.4 Análise de sensibilidade

Em 4.2.1 foram apresentados os pressupostos económicos necessários à análise energética e económica dos edifícios. Assumiu-se a incerteza dos agentes económicos, admitindo que o cenário considerado é apenas um dos possíveis.

O cenário económico admitido até aqui é recessivo, em que a taxa de inflação da energia (5%) é superior à taxa de atualização de capital (2%). Consideremos agora um cenário progressivo, uma realidade paralela em que a taxa de atualização de capital (5%) cobre largamente a inflação do preço da energia (2%). Assim, o custo da energia diminui, efetivamente, ano após ano, considerando estas taxas constantes ao longo dos 20 anos de análise.

O objetivo desta análise de sensibilidade é perceber quão fortes e independentes são os resultados e as conclusões deste capítulo, quanto ao melhor método construtivo energética e economicamente, face à variação destes parâmetros económicos.

Repetindo a metodologia de análise para os novos parâmetros económicos, verifica-se:

- Uma diminuição global do VAL, sendo que é pela poupança nos gastos energéticos que o VAL tem o potencial para aumentar, e a poupança económica pela redução dos consumos energéticos é tanto menor quanto menor for o preço da energia.
- A curva que maximiza o VAL é mais pronunciada à direita no sentido de consumos energéticos mais elevados uma vez que as estratégias de melhoramento térmico não trazem o mesmo benefício económico. Assim, as soluções de menor custo de investimento e mais consumidoras de energia tornam-se um pouco mais interessantes.
- Quer para cargas térmicas internas reduzidas ou relevantes, a solução LSF de custo ótimo continua a apresentar um VAL superior e um consumo energético inferior à solução convencional de custo ótimo.
- Na comparação direta entre os modelos LSF e convencionais equivalentes mantem-se a mesma tendência, onde os edifícios LSF se apresentam sempre com um VAL positivo que tende a aumentar à medida que as soluções se tornam mais eficazes termicamente.

Conclui-se que a mudança de cenário económico não afeta de forma significativa os resultados desta análise energética e económica, podendo-se assumir a veracidade das principais conclusões retiradas em 4.3.

4.5 Síntese do capítulo

Neste capítulo foi realizado um estudo energético e económico de edifícios do tipo LSF e convencional, sujeitos a cargas térmicas internas reduzidas e relevantes.

Foi com o intuito de concluir quanto à rentabilidade do investimento em estratégias de otimização do comportamento térmico que se analisaram diferentes soluções construtivas dentro de cada método, onde se fez variar o isolamento e massa térmica dos elementos construtivos. Através do indicador VAL, que se calcula pela diferença entre os ganhos monetários, ao longo de 20 anos, resultantes da redução dos consumos energéticos anuais, e o sobrecusto de investimento necessário para elevar o comportamento térmico do edifício, analisaram-se as soluções construtivas de modo a encontrar aquelas que apresentam o maior VAL, sendo a solução ótima aquela com o VAL máximo.

A solução construtiva ótima LSF, sujeita tanto a cargas térmicas internas reduzidas como a cargas relevantes, apresenta um VAL superior àquele verificado na solução construtiva ótima convencional. Mais, em ambas as soluções ótimas LSF, os respetivos consumos energéticos anuais são inferiores aos do edifício convencional.

Quando comparados diretamente, o método construtivo LSF apresenta sempre um VAL positivo em relação à solução construtiva “equivalente” de método convencional.

5 Conclusões

5.1 Sumário

No presente trabalho estudou-se o papel da inércia térmica na redução das necessidades de energia para climatização de edifícios, com o objetivo de identificar estratégias destinadas ao melhoramento do comportamento térmico e desempenho energético de edifícios construídos com recurso à técnica construtiva LSF, caracterizados por uma fraca inércia térmica quando comparados com edifícios em tudo semelhantes mas construídos recorrendo a tecnologias convencionais, sem esquecer as questões relacionadas com a respetiva viabilidade económica. Com resultado geral destaca-se desde logo a importância do local onde é mais benéfico adicionar massa térmica (paredes exteriores, cobertura, paredes interiores), assim como a necessidade de utilização de um material com elevada densidade energética e baixo custo. A análise comparativa dos diferentes modelos de edifícios, simulados com recurso ao *software DesignBuilder/EnergyPlus*, foi realizada recorrendo a uma metodologia em que cada modelo construtivo é avaliado considerando quatro níveis de isolamento térmico e duas condições de cargas térmicas internas.

A análise energética e económica foi realizada tendo como referência um período de 20 anos. O custo das soluções construtivas foi maioritariamente obtido através da ferramenta computacional Gerador de Preços, da Cype, SA©, tendo-se considerado um consumo energético anual constante e igual às necessidades de climatização anuais, assim como taxas de atualização de capital e de inflação do custo da energia constantes.

De uma forma geral conclui-se que edifícios do tipo LSF melhorados através da adição criteriosa de massa térmica em determinados elementos construtivos, apresentam necessidades de climatização anuais, na maioria dos casos estudados, inferiores àquelas verificadas em edifícios convencionais com inércia térmica média/forte. Conclui-se, também, que o método construtivo LSF se apresenta mais eficaz em termos energéticos e económicos quando comparado com soluções semelhantes construídas com recurso a um método convencional. Na secção seguinte são identificadas as principais conclusões deste trabalho.

5.2 Principais conclusões

Como principais conclusões deste trabalho é possível destacar:

- Um edifício construído pelo método LSF “normal” tem necessidades de climatização anuais de aquecimento e arrefecimento entre 65% e 87% superiores em relação a um edifício convencional igualmente isolado quando sujeito a cargas térmicas internas reduzidas (a diferença percentual tende a aumentar com o aumento da resistência térmica da envolvente exterior); e entre 17% e 46%

superiores quando sujeito a cargas térmicas internas relevantes (a diferença tende a diminuir com o aumento da resistência térmica da envolvente).

- As paredes de compartimentação interior apresentam-se como o elemento construtivo onde é mais eficaz adicionar massa térmica, com vista a reduzir as necessidades de climatização. A poupança (energética) pela inércia térmica (Ppi) é consideravelmente superior nas paredes interiores quando comparada a qualquer outro elemento construtivo.
- A água é um material com uma densidade energética muito elevada, superior a qualquer material construtivo típico, tendo sido usada na estratégia de otimização térmica do edifício LSF, pelo aumento da massa térmica das paredes interiores.
- Para um edifício com ganhos internos reduzidos, um volume de água correspondente à área do elemento construtivo multiplicado por uma espessura de 10 cm, incorporado nas paredes interiores, resulta em necessidades de climatização anuais 10% superiores às de um edifício convencional para um fraco nível de isolamento térmico ($U = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$) e 21% inferiores para um edifício muito bem isolado ($U = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$).
- No caso de um edifício sujeito a ganhos internos relevantes, o edifício LSF melhorado tem necessidades de climatização anuais entre os 5% e 9% inferiores relativamente ao edifício convencional.
- O edifício LSF melhorado, sendo cerca de 9 vezes mais leve do que um edifício construído em betão armado (excluindo o pavimento), consegue igualar e até superar o comportamento térmico e o desempenho energético deste último.
- O método construtivo LSF apresenta-se como uma melhor solução a nível energético e económico, quando se consideram estratégias de otimização térmica pelo aumento de isolamento e adição de água nas paredes. A solução ótima LSF consome menos energia de climatização do que a solução ótima convencional e apresenta um maior VAL face à solução de menor investimento. Quando comparados diretamente, o custo final do edifício LSF é sempre inferior ao do edifício convencional, para quaisquer soluções e cargas térmicas internas, sendo o VAL sempre positivo em relação ao edifício convencional “equivalente”.

5.3 Sugestões de trabalho futuro

O trabalho desenvolvido assume-se como um primeiro contributo no sentido de conciliar as vantagens associadas a duas tecnologias de construção de edifícios: uma mais convencional associada a uma produção por projeto executada no local da obra, recorrendo a materiais pesados, e uma outra com maior adaptabilidade a um modelo de produção industrial recorrendo a materiais por norma mais leves.

Foi proposta e analisada uma estratégia específica de melhoria, que se reconhece poder ser aprofundada, e mesmo materializada, de forma diversa.

Nesse sentido, apresentam-se algumas sugestões de trabalho futuro que poderão contribuir para uma validação mais detalhada das conclusões apresentadas, ou que simplesmente se apresentam como pertinentes numa eventual continuação deste trabalho:

- Realizar uma Análise Ciclo de Vida aos modelos construtivos estudados, possibilitando a análise comparativa do método construtivo LSF e convencional na vertente ambiental, completando o estudo efetuado em termos térmicos/energéticos e económicos.
- Executar uma Análise Custo Ciclo de Vida, onde sejam contabilizados todos os custos associados à construção do edifício LSF e convencional, incluindo a produção e transporte dos materiais construtivos e desmantelamento do edifício. Seria interessante testar estratégias de otimização térmica e energéticas mais alargadas, contabilizando todas as formas de consumos energéticos associadas ao edifício. Desta forma, ter-se-iam dados para concluir, de uma forma mais integrada, quanto ao melhor método construtivo em termos económicos. Também seria possível comparar os consumos das soluções testadas com os consumos energéticos definidos nas metas nZEB.
- Estudar um edifício de comércio/serviços real de elevada área útil de pavimento (superior a 1000 m^2) e comparar os resultados quanto ao benefício da massa térmica, com o modelo caracterizado com cargas térmicas internas relevantes, calculando a poupança anual expectável pela redução dos consumos energéticos, caso se apliquem estratégias de otimização pelo aumento da massa térmica nas paredes de compartimentação interior.
- Utilizar PCM's como material de massa térmica, dimensionando e otimizando o tipo e quantidade certa destes materiais quando aplicados nos elementos construtivos, em macrocápsulas ou misturados no material base em microcápsulas.
- Avaliar experimentalmente as soluções propostas recorrendo a uma célula de teste à escala real, cujas temperaturas interiores, geração de ganhos internos, balanço térmico da envolvente exterior e necessidades de climatização sejam medidos e monitorizados.
- Verificar a influência do clima em relação aos diferentes benefícios da massa térmica, quando aplicada em diferentes elementos construtivos, no comportamento térmico dos edifícios. Perceber se um clima frio e com reduzidos ganhos solares também propiciaria as mesmas conclusões.
- Estudar o efeito de fachadas e coberturas ventiladas quanto ao benefício na dissipação de ganhos solares durante a estação de arrefecimento e quanto ao desaproveitamento dos mesmos ganhos solares durante a estação de aquecimento.

- Estudar e desenvolver uma solução tecnológica que permita incorporar de forma segura e expedita o volume de água desejado no interior das paredes de compartimentação interior de edifícios do tipo LSF.

6 Referências bibliográficas

1. Ilmarinen J. 18.6. 2010. Off J Eur Union [Internet]. 2010 [cited 2014 Apr 12];13–35. Available from: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:18.6.2010#0>
2. PGM. The Story Of Stuff Project [Internet]. [cited 2014 Apr 13]. Available from: <http://storyofstuff.org/>
3. Kinga Dow Productions. Ecological Footprint [Internet]. [cited 2014 Apr 13]. Available from: <http://myfootprint.org/>
4. Rossi B, Marique A-F, Reiter S. Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, case study. Build Environ [Internet]. Elsevier Ltd; 2012 May [cited 2014 Mar 20];51:402–7. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132311003829>
5. International Institute for Sustainable Development. What is Sustainable Development? [Internet]. [cited 2014 Apr 14]. Available from: <http://www.iisd.org/sd/>
6. U.S. Environmental Protection Agency. Green Building [Internet]. [cited 2014 Apr 14]. Available from: <http://www.epa.gov/greenbuilding/>
7. Bragança L, Mateus R. Sustentabilidade de Soluções Construtivas.
8. National Institute of Building Science. WBDG [Internet]. [cited 2014 Apr 13]. Available from: <http://www.wbdg.org/resources/lcca.php>
9. Ågren R, Wing RD. Five moments in the history of industrialized building [Internet]. [cited 2014 Mar 2]. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01446193.2013.825374#.U0-R61VdUIJ>
10. Anderson G. Le Corbusier: Industrialization and Urban Planning [Internet]. [cited 2014 Apr 14]. Available from: http://www.academia.edu/6109749/Le_Corbusier_Industrialization_and_Urban_Planning
11. Buckminster Fuller Institute. About Fuller [Internet]. [cited 2014 Apr 14]. Available from: <http://www.bfi.org/about-fuller/big-ideas/dymaxion-world/dymaxion-house>
12. Habraken NJ. Open Building [Internet]. [cited 2014 Apr 14]. Available from: <http://www.habraken.com/html/introduction.htm>
13. III WK. Balloon Framing [Internet]. [cited 2014 Apr 14]. Available from: <http://www.oldhouseweb.com/how-to-advice/balloon-framing.shtml>
14. Penna FCF. ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO SISTEMA LIGHT STEEL FRAMING NA EXECUÇÃO DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL: UMA ABORDAGEM PRAGMÁTICA. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS; 2009.

15. GOMES AP. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES UNIFAMILIARES EM LIGHT STEEL FRAMING. UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO; 2007.
16. Dubina D. Behavior and performance of cold-formed steel-framed houses under seismic action. *J Constr Steel Res* [Internet]. 2008 Jul [cited 2014 Mar 26];64(7-8):896–913. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X0800028X>
17. The Engineering ToolBox. Coefficients of Linear Thermal Expansion [Internet]. [cited 2014 Apr 17]. Available from: http://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html
18. Raj VAA, Velraj R. Review on free cooling of buildings using phase change materials. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. Elsevier Ltd; 2010 Dec [cited 2014 Apr 9];14(9):2819–29. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403211000184X>
19. Waqas A, Kumar S. Thermal performance of latent heat storage for free cooling of buildings in a dry and hot climate: An experimental study. *Energy Build* [Internet]. Elsevier B.V.; 2011 Oct [cited 2014 Mar 20];43(10):2621–30. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778811002647>
20. Waqas A, Ud Din Z. Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. Elsevier; 2013 Feb [cited 2014 Mar 20];18:607–25. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403211200576X>
21. Ansuini R, Larghetti R, Giretti A, Lemma M. Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control. *Energy Build* [Internet]. Elsevier B.V.; 2011 Nov [cited 2014 Apr 9];43(11):3019–26. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778811003239>
22. Carpenter J, Mago PJ, Luck R, Cho H. Passive energy management through increased thermal capacitance. *Energy Build* [Internet]. Elsevier B.V.; 2014 Jun [cited 2014 Apr 9];75:465–71. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814001583>
23. Yu Y, Li H, Niu F, Yu D. Investigation of a coupled geothermal cooling system with earth tube and solar chimney. *Appl Energy* [Internet]. Elsevier Ltd; 2014 Feb [cited 2014 Apr 3];114:209–17. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191300785X>
24. Stazi F, Mastrucci A, di Perna C. Trombe wall management in summer conditions: An experimental study. *Sol Energy* [Internet]. Elsevier Ltd; 2012 Sep [cited 2014 Apr 9];86(9):2839–51. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X1200237X>
25. Kundakci Koyunbaba B, Yilmaz Z. The comparison of Trombe wall systems with single glass, double glass and PV panels. *Renew Energy* [Internet]. Elsevier Ltd; 2012 Sep [cited 2014 Apr 9];45:111–8. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148112001656>

26. Jaber S, Ajib S. Optimum design of Trombe wall system in mediterranean region. *Sol Energy* [Internet]. Elsevier Ltd; 2011 Sep [cited 2014 Apr 9];85(9):1891–8. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X11001459>
27. Briga-Sá A, Martins A, Boaventura-Cunha J, Lanzinha JC, Paiva A. Energy performance of Trombe walls: Adaptation of ISO 13790:2008(E) to the Portuguese reality. *Energy Build* [Internet]. Elsevier B.V.; 2014 May [cited 2014 Apr 9];74:111–9. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814000875>
28. Bojić M, Johannes K, Kuznik F. Optimizing energy and environmental performance of passive Trombe wall. *Energy Build* [Internet]. 2014 Feb [cited 2014 Apr 9];70:279–86. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877881300769X>
29. Fiorito F. Trombe Walls for Lightweight Buildings in Temperate and Hot Climates. Exploring the Use of Phase-change Materials for Performances Improvement. *Energy Procedia* [Internet]. Elsevier B.V.; 2012 Jan [cited 2014 Apr 8];30:1110–9. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610212016402>
30. Stazi F, Mastrucci A, di Perna C. The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: An experimental and numerical study. *Energy Build* [Internet]. Elsevier B.V.; 2012 Apr [cited 2014 Mar 19];47:217–29. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778811005858>
31. Hami K, Draoui B, Hami O. The thermal performances of a solar wall. *Energy* [Internet]. Elsevier Ltd; 2012 Mar [cited 2014 Apr 9];39(1):11–6. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544211006761>
32. Zalewski L, Joulin A, Lassue S, Dutil Y, Rousse D. Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material. *Sol Energy* [Internet]. 2012 Jan [cited 2014 Mar 27];86(1):208–19. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X11003525>
33. Nadia S, Noureddine S, Hichem N, Djamila D. Experimental Study of Thermal Performance and the Contribution of Plant-Covered Walls to the Thermal Behavior of Building. *Energy Procedia* [Internet]. Elsevier B.V.; 2013 Jan [cited 2014 Apr 9];36:995–1001. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610213011995>
34. Moody SS, Sailor DJ. Development and application of a building energy performance metric for green roof systems. *Energy Build* [Internet]. Elsevier B.V.; 2013 May [cited 2014 Apr 6];60:262–9. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778813000698>
35. Jaffal I, Ouldboukhitine S-E, Belarbi R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renew Energy* [Internet]. 2012 Jul [cited 2014 Mar 20];43:157–64. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148111006604>
36. Chan a. LS, Chow TT. Evaluation of Overall Thermal Transfer Value (OTTV) for commercial buildings constructed with green roof. *Appl Energy* [Internet]. Elsevier Ltd; 2013 Jul [cited 2014 Apr 9];107:10–24. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261913001189>

37. Berardi U, GhaffarianHoseini A, GhaffarianHoseini A. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Appl Energy* [Internet]. Elsevier Ltd; 2014 Feb [cited 2014 Mar 21];115:411–28. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261913008775>
38. Architecture Revived. Passive Solar Heating And Cooling Building Design [Internet]. [cited 2014 Apr 14]. Available from: <http://architecturerevived.blogspot.pt/2013/10/designing-passive-solar-heating-and.html>
39. David M, Donn M, Garde F, Lenoir a. Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades. *Build Environ* [Internet]. Elsevier Ltd; 2011 Jul [cited 2014 Mar 28];46(7):1489–96. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132311000321>
40. Tzempelikos A, Shen H. Comparative control strategies for roller shades with respect to daylighting and energy performance. *Build Environ* [Internet]. Elsevier Ltd; 2013 Sep [cited 2014 Mar 30];67:179–92. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132313001613>
41. Berry R, Livesley SJ, Aye L. Tree canopy shade impacts on solar irradiance received by building walls and their surface temperature. *Build Environ* [Internet]. Elsevier Ltd; 2013 Nov [cited 2014 Apr 7];69:91–100. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132313002060>
42. Gagliano a., Patania F, Nocera F, Signorello C. Assessment of the dynamic thermal performance of massive buildings. *Energy Build* [Internet]. Elsevier B.V.; 2014 Apr [cited 2014 Apr 9];72:361–70. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814000097>
43. Tonelli C, Grimaudo M. Timber buildings and thermal inertia: Open scientific problems for summer behavior in Mediterranean climate. *Energy Build* [Internet]. Elsevier B.V.; 2014 Feb [cited 2014 Apr 9]; Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814001388>
44. Al-Sanea S a., Zedan MF, Al-Hussain SN. Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential. *Appl Energy* [Internet]. Elsevier Ltd; 2012 Jan [cited 2014 Mar 19];89(1):430–42. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261911005058>
45. Kośny J. Understanding a Potential for Application of Phase-Change Materials (PCMs) in Building Envelopes. 2013;3–13.
46. Soares N, Gaspar a. R, Santos P, Costa JJ. Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates. *Energy Build* [Internet]. Elsevier B.V.; 2014 Feb [cited 2014 Apr 9];70:411–21. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778813007895>
47. Memon SA. Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. Elsevier; 2014 Mar [cited 2014 Apr 9];31:870–906. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113008563>

48. Karim L, Barbeon F, Gegout P, Bontemps a., Royon L. New phase-change material components for thermal management of the light weight envelope of buildings. *Energy Build* [Internet]. Elsevier B.V.; 2014 Jan [cited 2014 Apr 9];68:703–6. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778813005537>
49. Bastani A, Haghightat F, Kozinski J. Designing building envelope with PCM wallboards: Design tool development. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. Elsevier; 2014 Mar [cited 2014 Apr 9];31(2014):554–62. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113008459>
50. Labat M, Virgone J, David D, Kuznik F. Experimental assessment of a PCM to air heat exchanger storage system for building ventilation application. *Appl Therm Eng* [Internet]. Elsevier Ltd; 2014 May [cited 2014 Apr 9];66(1-2):375–82. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135943111400115X>
51. Pomianowski M, Heiselberg P, Zhang Y. Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings. *Energy Build* [Internet]. Elsevier B.V.; 2013 Dec [cited 2014 Mar 22];67:56–69. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778813005033>
52. ASHRAE Standards. Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. 2004;
53. The University of Wisconsin Madison. TRNSYS Frequently Asked Questions [Internet]. [cited 2014 Apr 22]. Available from: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/faq/faq.htm>
54. Carrier. Hourly Analysis Program (HAP) 8760 Hour Load & Energy Analysis [Internet]. [cited 2014 Apr 22]. Available from: http://www.commercial.carrier.com/commercial/hvac/general/1,,CLI1_DIV12_ETI496,00.html?SMSESSION=NO
55. DesignBuilder. Standards Used In DesignBuilder [Internet]. [cited 2014 Apr 22]. Available from: <http://www.designbuilder.co.uk/helpv3.4/#Standards.htm?Highlight=ASHRAE> 140
56. Lawrence Berkeley National Laboratory. GenOpt Generic Optimization Program [Internet]. [cited 2014 Apr 22]. Available from: <http://simulationresearch.lbl.gov/GO/>
57. Hermelink A. TOWARDS NEARLY ZERO-ENERGY BUILDINGS. 2014;
58. Kurnitski J, Buso T, Corgnati SP, Derjanecz A, Litiu A. nZEB definitions in Europe. 2014;(March).
59. MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO. Decreto-Lei 118.2013 de 20 de Agosto. 2013 p. 4988–5005.
60. Laureano AÁ, Trindade H da. Portaria n.º 349-B/2013 - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) — Requisitos de conceção para edifícios novos e intervenções. 2013 p. 18–29.
61. Ministério do Ambiente, Ministério Ordenamento do Território e Energia, Ministério da Saúde e da Solidariedade, Social M do E e S. Portaria n.º 353-A/2013 - REGULAMENTO

DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS DE COMÉRCIO E SERVIÇOS
(RECS) REQUISITOS DE VENTILAÇÃO E QUALIDADE DO AR INTERIOR. 2013.

62. Inventio. Projeto de Arquitectura - moradia familiar e muros de vedação. 2013.
63. Incropera FP, DeWitt DP. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 5^a ed.
64. The Engineering ToolBox. Heat Storage in Materials Physical properties of sensible heat storage materials [Internet]. [cited 2014 Oct 17]. Available from: http://www.engineeringtoolbox.com/sensible-heat-storage-d_1217.html
65. © CYPE Ingenieros SA. Gerador de Preços. Portugal [Internet]. [cited 2014 Oct 29]. Available from: <http://www.geradordeprecos.info/>

7 Anexos

7.1 Anexo I – Caracterização das soluções construtivas do edifício LSF e convencional

Tabela AI.1 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício LSF para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,4 W/(m^2 \cdot K)$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$m^2 \cdot K/W$]	Densidade energética D [$kJ/(m^3 \cdot K)$]
Paredes exteriores U0,4	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	2,5	511,42
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,63		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,4	Rufo metálico	0,29	1000	1250	0,07	2,5	388,99
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,76		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30	-	424,90
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		

Tabela A1.2 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício LSF para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]	Densidade energética D [$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$]
Paredes exteriores U0,25	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	4	360,36
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	13,33		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,25	Rufo metálico	0,29	1000	1250	0,07	4	268,62
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	13,46		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30	-	424,90
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		

Tabela A1.3 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício LSF para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]	Densidade energética D [$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$]
Paredes exteriores U0,1	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	10	177,89
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	36,13		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,1	Rufo metálico	0,29	1000	1250	0,07	10	133,41
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	36,26		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30	-	424,90
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		

Tabela AI.4 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício convencional para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,4 W/(m^2 \cdot K)$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$m^2 \cdot K/W$]	Densidade energética D [$kJ/(m^3 \cdot K)$]
Paredes exteriores U0,4	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	2,5	966,49
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,72		
	Alvenaria tijolo cerâmico	0,62	800	1700	15,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,4	Telha cerâmica	1,00	800	2000	2,50	2,5	1642,70
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,71		
	Laje de betão armado	2,30	1000	2300	20,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	3,00	-	1384,43
	Alvenaria tijolo cerâmico	0,62	800	1700	7,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	10,00		

Tabela AI.5 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício convencional para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,25 W/(m^2 \cdot K)$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$m^2 \cdot K/W$]	Densidade energética D [$kJ/(m^3 \cdot K)$]
Paredes exteriores U0,25	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	4	798,32
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	13,42		
	Alvenaria tijolo cerâmico	0,62	800	1700	15,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,25	Telha cerâmica	1,00	800	2000	2,50	4	1417,09
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	12,93		
	Laje de betão armado	2,30	1000	2300	20,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	3,00	-	1384,43
	Alvenaria tijolo cerâmico	0,62	800	1700	7,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	10,00		

Tabela A1.6 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício convencional para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,1 W/(m^2 \cdot K)$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$m^2 \cdot K/W$]	Densidade energética D [$kJ/(m^3 \cdot K)$]
Paredes exteriores U0,1	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	10	477,93
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	36,22		
	Alvenaria tijolo cerâmico	0,62	800	1700	15,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,1	Telha cerâmica	1,00	800	2000	2,50	10	917,69
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	33,96		
	Laje de betão armado	2,30	1000	2300	20,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	3,00	-	1384,43
	Alvenaria tijolo cerâmico	0,62	800	1700	7,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	10,00		

7.2 Anexo II – Caracterização das condições operacionais

Tabela AII.1 – Perfil de ocupação do edifício de cargas térmicas internas reduzidas

Horas	Dias de semana	Fins-de-semana
00:00 - 01:00	1	1
01:00 - 02:00	1	1
02:00 - 03:00	1	1
03:00 - 04:00	1	1
04:00 - 05:00	1	1
05:00 - 06:00	1	1
06:00 - 07:00	1	1
07:00 - 08:00	1	1
08:00 - 09:00	1	1
09:00 - 10:00	0	1
10:00 - 11:00	0	1
11:00 - 12:00	0	1
12:00 - 13:00	0	1
13:00 - 14:00	1	1
14:00 - 15:00	0	0
15:00 - 16:00	0	0
16:00 - 17:00	0	0
17:00 - 18:00	0	0
18:00 - 19:00	0	0
19:00 - 20:00	1	1
20:00 - 21:00	1	1
21:00 - 22:00	1	1
22:00 - 23:00	1	0
23:00 - 24:00	1	0

Tabela AII.2 – Perfil de ocupação do edifício de cargas térmicas internas relevantes

Horas	Dias de semana	Fins-de-semana
00:00 - 01:00	0	0
01:00 - 02:00	0	0
02:00 - 03:00	0	0
03:00 - 04:00	0	0
04:00 - 05:00	0	0
05:00 - 06:00	0	0
06:00 - 07:00	0	0
07:00 - 08:00	0	0
08:00 - 09:00	0	0
09:00 - 10:00	1	0
10:00 - 11:00	1	0
11:00 - 12:00	1	0
12:00 - 13:00	1	0
13:00 - 14:00	0	0
14:00 - 15:00	1	0
15:00 - 16:00	1	0
16:00 - 17:00	1	0
17:00 - 18:00	1	0
18:00 - 19:00	1	0
19:00 - 20:00	0	0
20:00 - 21:00	0	0
21:00 - 22:00	0	0
22:00 - 23:00	0	0
23:00 - 24:00	0	0

Tabela AII.3 – Perfil de utilização da iluminação geral no edifício de cargas térmicas internas reduzidas

Horas	Dias de semana	Fins-de-semana
00:00 - 01:00	0	0
01:00 - 02:00	0	0
02:00 - 03:00	0	0
03:00 - 04:00	0	0
04:00 - 05:00	0	0
05:00 - 06:00	0	0
06:00 - 07:00	0	0
07:00 - 08:00	0	0
08:00 - 09:00	0,1	0
09:00 - 10:00	0	0
10:00 - 11:00	0	0,1
11:00 - 12:00	0	0
12:00 - 13:00	0	0
13:00 - 14:00	0,05	0,05
14:00 - 15:00	0	0
15:00 - 16:00	0	0
16:00 - 17:00	0	0
17:00 - 18:00	0	0
18:00 - 19:00	0	0
19:00 - 20:00	0,5	0,5
20:00 - 21:00	0,5	0,5
21:00 - 22:00	0,5	0,5
22:00 - 23:00	0,5	0
23:00 - 24:00	0,5	0

Tabela AII.4 – Perfil de utilização da iluminação de secretária no edifício de cargas térmicas internas reduzidas

Horas	Dias de semana	Fins-de-semana
00:00 - 01:00	0	0
01:00 - 02:00	0	0
02:00 - 03:00	0	0
03:00 - 04:00	0	0
04:00 - 05:00	0	0
05:00 - 06:00	0	0
06:00 - 07:00	0	0
07:00 - 08:00	0	0
08:00 - 09:00	0	0
09:00 - 10:00	0	0
10:00 - 11:00	0	0
11:00 - 12:00	0	0
12:00 - 13:00	0	0
13:00 - 14:00	0	0
14:00 - 15:00	0	0
15:00 - 16:00	0	0
16:00 - 17:00	0	0
17:00 - 18:00	0	0
18:00 - 19:00	0	0
19:00 - 20:00	0	0
20:00 - 21:00	0,75	0,75
21:00 - 22:00	0,75	0,75
22:00 - 23:00	0,5	0,5
23:00 - 24:00	0,5	0,5

Tabela AII.5 – Perfil de utilização da iluminação geral e de secretária no edifício de cargas térmicas internas relevantes

Horas	Dias de semana	Fins-de-semana
00:00 - 01:00	0	0
01:00 - 02:00	0	0
02:00 - 03:00	0	0
03:00 - 04:00	0	0
04:00 - 05:00	0	0
05:00 - 06:00	0	0
06:00 - 07:00	0	0
07:00 - 08:00	0	0
08:00 - 09:00	0	0
09:00 - 10:00	0,25	0
10:00 - 11:00	0,25	0
11:00 - 12:00	0,25	0
12:00 - 13:00	0,25	0
13:00 - 14:00	0	0
14:00 - 15:00	0,5	0
15:00 - 16:00	0,5	0
16:00 - 17:00	0,5	0
17:00 - 18:00	1	0
18:00 - 19:00	1	0
19:00 - 20:00	0	0
20:00 - 21:00	0	0
21:00 - 22:00	0	0
22:00 - 23:00	0	0
23:00 - 24:00	0	0

Tabela AII.6 – Perfil de utilização de computadores e televisões no edifício de cargas térmicas internas reduzidas

Horas	Dias de semana	Fins-de-semana
00:00 - 01:00	0	0
01:00 - 02:00	0	0
02:00 - 03:00	0	0
03:00 - 04:00	0	0
04:00 - 05:00	0	0
05:00 - 06:00	0	0
06:00 - 07:00	0	0
07:00 - 08:00	0	0
08:00 - 09:00	0	0
09:00 - 10:00	0	0
10:00 - 11:00	0	1
11:00 - 12:00	0	1
12:00 - 13:00	0	1
13:00 - 14:00	0,5	1
14:00 - 15:00	0	0
15:00 - 16:00	0	0
16:00 - 17:00	0	0
17:00 - 18:00	0	0
18:00 - 19:00	0	0
19:00 - 20:00	1	0,5
20:00 - 21:00	1	0,5
21:00 - 22:00	1	0,5
22:00 - 23:00	1	0
23:00 - 24:00	1	0

Tabela AII.7 – Perfil de utilização do frigorífico no edifício de cargas térmicas internas reduzidas

Horas	Dias de semana	Fins-de-semana
00:00 - 01:00	1	1
01:00 - 02:00	1	1
02:00 - 03:00	1	1
03:00 - 04:00	1	1
04:00 - 05:00	1	1
05:00 - 06:00	1	1
06:00 - 07:00	1	1
07:00 - 08:00	1	1
08:00 - 09:00	1	1
09:00 - 10:00	1	1
10:00 - 11:00	1	1
11:00 - 12:00	1	1
12:00 - 13:00	1	1
13:00 - 14:00	1	1
14:00 - 15:00	1	1
15:00 - 16:00	1	1
16:00 - 17:00	1	1
17:00 - 18:00	1	1
18:00 - 19:00	1	1
19:00 - 20:00	1	1
20:00 - 21:00	1	1
21:00 - 22:00	1	1
22:00 - 23:00	1	1
23:00 - 24:00	1	1

Tabela AII.8 - Perfil de utilização de computadores e equipamento de escritório no edifício de cargas térmicas internas relevantes

Horas	Dias de semana	Fins-de-semana
00:00 - 01:00	0	0
01:00 - 02:00	0	0
02:00 - 03:00	0	0
03:00 - 04:00	0	0
04:00 - 05:00	0	0
05:00 - 06:00	0	0
06:00 - 07:00	0	0
07:00 - 08:00	0	0
08:00 - 09:00	0	0
09:00 - 10:00	1	0
10:00 - 11:00	1	0
11:00 - 12:00	1	0
12:00 - 13:00	1	0
13:00 - 14:00	0	0
14:00 - 15:00	1	0
15:00 - 16:00	1	0
16:00 - 17:00	1	0
17:00 - 18:00	1	0
18:00 - 19:00	1	0
19:00 - 20:00	0	0
20:00 - 21:00	0	0
21:00 - 22:00	0	0
22:00 - 23:00	0	0
23:00 - 24:00	0	0

Tabela AII.9 - Perfil de utilização do frigorífico no edifício de cargas térmicas internas relevantes

Horas	Dias de semana	Fins-de-semana
00:00 - 01:00	1	0
01:00 - 02:00	1	0
02:00 - 03:00	1	0
03:00 - 04:00	1	0
04:00 - 05:00	1	0
05:00 - 06:00	1	0
06:00 - 07:00	1	0
07:00 - 08:00	1	0
08:00 - 09:00	1	0
09:00 - 10:00	1	0
10:00 - 11:00	1	0
11:00 - 12:00	1	0
12:00 - 13:00	1	0
13:00 - 14:00	1	0
14:00 - 15:00	1	0
15:00 - 16:00	1	0
16:00 - 17:00	1	0
17:00 - 18:00	1	0
18:00 - 19:00	1	0
19:00 - 20:00	1	0
20:00 - 21:00	1	0
21:00 - 22:00	1	0
22:00 - 23:00	1	0
23:00 - 24:00	1	0

7.3 Anexo III – Caracterização das soluções construtivas do edifício de betão armado e LSF melhorado

Tabela AIII.1 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício de betão para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]	Densidade energética D [$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$]
Paredes exteriores U0,4	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	2,5	1781,52
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	8,15		
	Betão armado	2,30	1000	2300	30,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,4	Telha cerâmica	1,00	800	2000	2,50	2,5	1805,49
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,56		
	Laje de betão armado	2,30	1000	2300	30,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30	-	1892,37
	Betão	1,13	1000	2000	10,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		

Tabela AIII.2 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício de betão para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]	Densidade energética D [$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$]
Paredes exteriores U0,25	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	4	1569,76
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	13,85		
	Betão armado	2,3	1000	2300	30,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,25	Telha cerâmica	1,00	800	2000	2,50	4	1608,03
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	12,81		
	Laje de betão armado	2,30	1000	2300	30,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30	-	1892,37
	Betão	1,13	1000	2000	10,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		

Tabela AIII.3 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício de betão para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]	Densidade energética D [$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$]
Paredes exteriores U0,1	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	10	1068,34
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	36,65		
	Betão armado	2,30	1000	2300	30,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,1	Telha cerâmica	1,00	800	2000	2,50	10	1122,59
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	33,81		
	Laje de betão armado	2,30	1000	2300	30,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30	-	1892,37
	Betão	1,13	1000	2000	10,00		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		

Tabela AIII.4 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício LSF melhorado para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,4 W/(m^2 \cdot K)$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$m^2 \cdot K/W$]	Densidade energética D [$kJ/(m^3 \cdot K)$]
Paredes exteriores U0,4	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	2,5	511,42
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,63		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,4	Rufo metálico	0,29	1000	1250	0,07	2,5	388,99
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	7,76		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30	-	3539,90
	Polipropileno	0,22	1800	910	0,30		
	Água	0,60	4190	1000	10,00		
	Polipropileno	0,22	1800	910	0,30		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		

Tabela AIII.5 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício LSF melhorado para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,25 W/(m^2 \cdot K)$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$m^2 \cdot K/W$]	Densidade energética D [$kJ/(m^3 \cdot K)$]
Paredes exteriores U0,25	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	4	360,36
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	13,33		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,25	Rufo metálico	0,29	1000	1250	0,07	4	268,62
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	13,46		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30	-	3539,90
	Polipropileno	0,22	1800	910	0,30		
	Água	0,60	4190	1000	10,00		
	Polipropileno	0,22	1800	910	0,30		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		

Tabela AIII.6 - Solução construtiva das paredes e cobertura do edifício LSF melhorado para um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior de $0,1 W/(m^2 \cdot K)$

	Material	k	c_p	ρ	e	Resistência térmica R'' [$m^2 \cdot K/W$]	Densidade energética D [$kJ/(m^3 \cdot K)$]
Paredes exteriores U0,1	Reboco	0,50	1000	1300	1,90	10	177,89
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	36,13		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Cobertura U0,1	Rufo metálico	0,29	1000	1250	0,07	10	133,41
	Tela asfáltica	0,19	837	960	0,50		
	Isolamento (lã de rocha)	0,038	840	40	36,26		
	OSB	0,13	1700	650	1,50		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		
Paredes interiores	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30	-	3539,90
	Polipropileno	0,22	1800	910	0,30		
	Água	0,60	4190	1000	10,00		
	Polipropileno	0,22	1800	910	0,30		
	Painel cimentício	0,72	840	1760	1,30		

7.4 Anexo IV – Soluções construtivas e respetivos indicadores energéticos e económicos

Tabela AIV.1 - Soluções construtivas convencionais sujeitas a cargas térmicas internas reduzidas e respetivos indicadores energéticos e económicos

Solução	C_a [kWh/m ²]	I_0 [€/m ²]	$\sum_{i=0}^N c_a \cdot C_{e0} \cdot \frac{(1+t)^i}{(1+d)^i}$ [€/m ²]	C_f [€/m ²]	SC [€/m ²]	PCE [€/m ²]	VAL [€/m ²]
0,8-l-l	25,33	463,42	135,30	598,72	16,44	-14,44	-30,88
0,8-l-m	22,62	446,99	120,85	567,84	0,00	0,00	0,00
0,8-l-p	21,95	449,13	117,26	566,40	2,15	3,59	1,45
0,8-m-l	24,63	475,35	131,58	606,92	28,36	-10,72	-39,08
0,8-m-m	22,07	458,91	117,88	576,79	11,92	2,98	-8,94
0,8-m-p	21,40	461,06	114,30	575,35	14,07	6,56	-7,51
0,8-p-l	24,26	496,59	129,59	626,17	49,60	-8,73	-58,33
0,8-p-m	21,71	480,15	115,99	596,14	33,16	4,87	-28,30
0,8-p-p	21,03	482,30	112,35	594,65	35,31	8,50	-26,80
0,4-l-l	12,28	475,27	65,60	540,87	28,29	55,25	26,97
0,4-l-m	9,88	458,84	52,79	511,62	11,85	68,07	56,22
0,4-l-p	9,26	460,98	49,49	510,48	14,00	71,36	57,37
0,4-m-l	11,77	487,20	62,86	550,06	40,21	57,99	17,78
0,4-m-m	9,46	470,76	50,55	521,32	23,77	70,30	46,53
0,4-m-p	8,85	472,91	47,30	520,21	25,92	73,55	47,63
0,4-p-l	11,56	508,44	61,75	570,19	61,45	59,10	-2,35
0,4-p-m	9,27	492,00	49,52	541,52	45,01	71,33	26,32
0,4-p-p	8,67	494,15	46,32	540,46	47,16	74,54	27,38
0,25-l-l	8,12	489,91	43,36	533,27	42,92	77,49	34,57
0,25-l-m	6,23	473,47	33,30	506,77	26,48	87,55	61,07
0,25-l-p	5,78	475,62	30,88	506,50	28,63	89,97	61,35
0,25-m-l	7,74	501,83	41,35	543,18	54,84	79,51	24,67
0,25-m-m	5,95	485,39	31,81	517,20	38,41	89,05	50,64
0,25-m-p	5,54	487,54	29,57	517,11	40,55	91,28	50,73
0,25-p-l	7,60	523,07	40,60	563,67	76,08	80,25	4,17
0,25-p-m	5,84	506,63	31,22	537,85	59,64	89,63	29,99
0,25-p-p	5,43	508,78	29,02	537,80	61,79	91,83	30,04
0,1-l-l	4,96	551,62	26,49	578,11	104,64	94,37	-10,27
0,1-l-m	3,75	535,19	20,02	555,21	88,20	100,83	12,63
0,1-l-p	3,47	537,33	18,53	555,87	90,34	102,32	11,98
0,1-m-l	4,76	563,55	25,45	588,99	116,56	95,41	-21,15
0,1-m-m	3,62	547,11	19,32	566,43	100,12	101,54	1,42
0,1-m-p	3,36	549,26	17,95	567,20	102,27	102,91	0,64
0,1-p-l	4,72	584,78	25,21	609,99	137,80	95,64	-42,15
0,1-p-m	3,58	568,35	19,14	587,49	121,36	101,72	-19,64

0,1-p-p	3,33	570,49	17,79	588,29	123,51	103,06	-20,44
---------	------	--------	-------	--------	--------	--------	--------

Tabela AIV.2 - Soluções construtivas, LSF e convencionais, sujeitas a cargas térmicas internas reduzidas e respetivos indicadores energéticos e económicos

Solução	I_0 convencional [€/m ²]	SC LSF [€/m ²]	$\sum_{i=0}^N c_a \cdot c_{e0} \cdot \frac{(1+t)^i}{(1+d)^i}$ convencional [€/m ²]	PCE LSF [€/m ²]	C_f convencional [€/m ²]	VAL LSF [€/m ²]
0,8-l-l	463,42	-79,98	135,30	-64,46	598,72	15,53
0,8-l-m	446,99	-62,99	120,85	-12,54	567,84	50,45
0,8-l-p	449,13	-53,29	117,26	-7,05	566,40	46,25
0,8-m-l	475,35	-49,70	131,58	-32,62	606,92	17,09
0,8-m-m	458,91	-32,71	117,88	-3,86	576,79	28,84
0,8-m-p	461,06	-23,01	114,30	1,35	575,35	24,36
0,8-p-l	496,59	-49,84	129,59	-31,61	626,17	18,23
0,8-p-m	480,15	-32,84	115,99	-3,86	596,14	28,98
0,8-p-p	482,30	-23,15	112,35	1,15	594,65	24,30
0,4-l-l	475,27	-77,53	65,60	-28,93	540,87	48,60
0,4-l-m	458,84	-60,54	52,79	2,07	511,62	62,61
0,4-l-p	460,98	-50,84	49,49	5,75	510,48	56,59
0,4-m-l	487,20	-47,25	62,86	-13,77	550,06	33,48
0,4-m-m	470,76	-30,26	50,55	6,54	521,32	36,79
0,4-m-p	472,91	-20,56	47,30	9,49	520,21	30,05
0,4-p-l	508,44	-47,39	61,75	-3,67	570,19	43,72
0,4-p-m	492,00	-30,39	49,52	7,42	541,52	37,81
0,4-p-p	494,15	-20,70	46,32	9,92	540,46	30,62
0,25-l-l	489,91	-79,77	43,36	-18,76	533,27	61,01
0,25-l-m	473,47	-62,78	33,30	4,88	506,77	67,66
0,25-l-p	475,62	-53,08	30,88	6,83	506,50	59,91
0,25-m-l	501,83	-49,49	41,35	-7,92	543,18	41,57
0,25-m-m	485,39	-32,49	31,81	7,12	517,20	39,62
0,25-m-p	487,54	-22,80	29,57	8,77	517,11	31,57
0,25-p-l	523,07	-49,63	40,60	-6,44	563,67	43,19
0,25-p-m	506,63	-32,63	31,22	7,62	537,85	40,25
0,25-p-p	508,78	-22,94	29,02	9,35	537,80	32,28
0,1-l-l	551,62	-91,46	26,49	-9,78	578,11	81,68
0,1-l-m	535,19	-74,47	20,02	4,16	555,21	78,62
0,1-l-p	537,33	-64,77	18,53	4,95	555,87	69,72
0,1-m-l	563,55	-61,18	25,45	-2,82	588,99	58,36
0,1-m-m	547,11	-44,18	19,32	5,10	566,43	49,28
0,1-m-p	549,26	-34,49	17,95	5,61	567,20	40,09
0,1-p-l	584,78	-61,32	25,21	-1,51	609,99	59,81
0,1-p-m	568,35	-44,32	19,14	5,39	587,49	49,71

0,1-p-p	570,49	-34,63	17,79	5,85	588,29	40,47
---------	--------	--------	-------	------	--------	-------

Tabela AIV.3 - Soluções construtivas LSF sujeitas a cargas térmicas internas relevantes e respetivos indicadores energéticos e económicos

Solução	C_a [kWh/ m ²]	I_0 [€/m ²]	$\sum_{i=0}^N c_a \cdot C_{e0} \cdot \frac{(1+t)^i}{(1+d)^i}$ [€/m ²]	C_f [€/m ²]	SC [€/m ²]	PCE [€/m ²]	VAL [€/m ²]
0,8-l-l	46,59	383,44	248,87	632,31	0,00	0,00	0,00
0,8-l-m	29,74	384,00	158,88	542,88	0,56	89,99	89,43
0,8-l-p	28,91	395,84	154,42	550,27	12,40	94,44	82,04
0,8-m-l	39,12	425,64	208,97	634,62	42,20	39,89	-2,31
0,8-m-m	27,72	426,20	148,10	574,30	42,76	100,77	58,00
0,8-m-p	26,75	438,05	142,90	580,94	54,61	105,97	51,36
0,8-p-l	38,81	446,75	207,32	654,07	63,31	41,54	-21,76
0,8-p-m	27,49	447,31	146,87	594,18	63,87	101,99	38,13
0,8-p-p	26,54	459,15	141,80	600,95	75,71	107,06	31,36
0,4-l-l	34,43	397,74	183,95	581,69	14,30	64,92	50,62
0,4-l-m	23,62	398,30	126,16	524,46	14,86	122,71	107,85
0,4-l-p	23,11	410,14	123,48	533,62	26,70	125,39	98,69
0,4-m-l	31,06	439,94	165,91	605,86	56,50	82,95	26,45
0,4-m-m	22,71	440,50	121,33	561,84	57,06	127,53	70,47
0,4-m-p	22,26	452,35	118,89	571,23	68,91	129,98	61,07
0,4-p-l	30,80	461,05	164,54	625,59	77,61	84,32	6,71
0,4-p-m	22,57	461,61	120,55	582,15	78,17	128,32	50,15
0,4-p-p	22,15	473,45	118,34	591,79	90,01	130,53	40,52
0,25-l-l	30,53	410,13	163,08	573,21	26,69	85,79	59,09
0,25-l-m	22,61	410,69	120,79	531,48	27,25	128,08	100,82
0,25-l-p	22,31	422,54	119,16	541,70	39,10	129,71	90,61
0,25-m-l	28,14	452,34	150,34	602,68	68,90	98,53	29,63
0,25-m-m	22,10	452,90	118,05	570,94	69,46	130,82	61,36
0,25-m-p	21,77	464,74	116,31	581,05	81,30	132,55	51,25
0,25-p-l	27,89	473,44	148,97	622,41	90,00	99,90	9,89
0,25-p-m	22,00	474,00	117,52	591,53	90,56	131,34	40,78
0,25-p-p	21,68	485,84	115,84	601,68	102,40	133,03	30,63
0,1-l-l	27,22	460,16	145,42	605,59	76,72	103,44	26,72
0,1-l-m	22,07	460,72	117,92	578,65	77,28	130,94	53,66
0,1-l-p	21,81	472,56	116,50	589,06	89,12	132,37	43,25
0,1-m-l	25,81	502,37	137,86	640,23	118,93	111,00	-7,92
0,1-m-m	21,78	502,93	116,34	619,27	119,49	132,52	13,04
0,1-m-p	21,49	514,77	114,78	629,55	131,33	134,08	2,76
0,1-p-l	25,63	523,47	136,91	660,38	140,03	111,95	-28,08
0,1-p-m	21,71	524,03	115,98	640,01	140,59	132,89	-7,70

0,1-p-p	21,42	535,87	114,45	650,32	152,43	134,42	-18,01
---------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Tabela AIV.4 - Soluções construtivas convencionais sujeitas a cargas térmicas internas relevantes e respetivos indicadores energéticos e económicos

Solução	C_a [kWh/ m ²]	I_0 [€/m ²]	$\sum_{i=0}^N c_a \cdot C_{e0} \cdot \frac{(1+t)^i}{(1+d)^i}$ [€/m ²]	C_f [€/m ²]	SC [€/m ²]	PCE [€/m ²]	VAL [€/m ²]
0,8-l-l	35,98	463,42	192,20	655,62	16,44	-22,18	-38,61
0,8-l-m	31,83	446,99	170,02	617,01	0,00	0,00	0,00
0,8-l-p	31,16	449,13	166,44	615,57	2,15	3,59	1,44
0,8-m-l	35,53	475,35	189,81	665,15	28,36	-19,78	-48,14
0,8-m-m	31,45	458,91	167,99	626,90	11,92	2,03	-9,89
0,8-m-p	30,78	461,06	164,44	625,50	14,07	5,58	-8,49
0,8-p-l	35,23	496,59	188,21	684,79	49,60	-18,18	-67,78
0,8-p-m	31,16	480,15	166,44	646,59	33,16	3,58	-29,58
0,8-p-p	30,48	482,30	162,81	645,11	35,31	7,21	-28,10
0,4-l-l	29,55	475,27	157,85	633,13	28,29	12,17	-16,12
0,4-l-m	25,87	458,84	138,22	597,05	11,85	31,81	19,96
0,4-l-p	25,41	460,98	135,73	596,72	14,00	34,29	20,29
0,4-m-l	29,29	487,20	156,47	643,67	40,21	13,55	-26,66
0,4-m-m	25,66	470,76	137,06	607,82	23,77	32,97	9,19
0,4-m-p	25,21	472,91	134,69	607,60	25,92	35,33	9,41
0,4-p-l	29,20	508,44	156,00	664,43	61,45	14,03	-47,42
0,4-p-m	25,59	492,00	136,71	628,71	45,01	33,31	-11,70
0,4-p-p	25,16	494,15	134,38	628,53	47,16	35,64	-11,52
0,25-l-l	27,17	489,91	145,13	635,03	42,92	24,90	-18,02
0,25-l-m	24,39	473,47	130,29	603,76	26,48	39,73	13,25
0,25-l-p	24,06	475,62	128,54	604,15	28,63	41,49	12,86
0,25-m-l	27,02	501,83	144,34	646,17	54,84	25,68	-29,16
0,25-m-m	24,27	485,39	129,64	615,03	38,41	40,38	1,98
0,25-m-p	23,95	487,54	127,94	615,48	40,55	42,08	1,53
0,25-p-l	26,93	523,07	143,87	666,93	76,08	26,16	-49,92
0,25-p-m	24,19	506,63	129,25	635,88	59,64	40,78	-18,87
0,25-p-p	23,88	508,78	127,55	636,33	61,79	42,47	-19,32
0,1-l-l	25,57	551,62	136,60	688,22	104,64	33,42	-71,21
0,1-l-m	23,27	535,19	124,31	659,50	88,20	45,71	-42,49
0,1-l-p	22,98	537,33	122,74	660,07	90,34	47,28	-43,06
0,1-m-l	25,48	563,55	136,11	699,66	116,56	33,91	-82,65
0,1-m-m	23,19	547,11	123,88	670,99	100,12	46,14	-53,98
0,1-m-p	22,90	549,26	122,35	671,61	102,27	47,67	-54,59
0,1-p-l	25,41	584,78	135,75	720,53	137,80	34,28	-103,52
0,1-p-m	23,14	568,35	123,63	691,98	121,36	46,39	-74,97

0,1-p-p	22,86	570,49	122,10	692,60	123,51	47,92	-75,59
---------	-------	--------	--------	--------	--------	-------	--------

Tabela AIV.5 - Soluções construtivas, LSF e convencionais, sujeitas a cargas térmicas internas relevantes e respetivos indicadores energéticos e económicos

Solução	I_0 convencional [€/m ²]	SC LSF [€/m ²]	$\sum_{i=0}^N c_a \cdot c_{e0} \cdot \frac{(1+t)^i}{(1+d)^i}$ convencional [€/m ²]	PCE LSF [€/m ²]	C_f convencional [€/m ²]	VAL LSF [€/m ²]
0,8-l-l	463,42	-79,98	192,20	-56,66	655,62	23,32
0,8-l-m	446,99	-62,99	170,02	11,14	617,01	74,13
0,8-l-p	449,13	-53,29	166,44	12,01	615,57	65,30
0,8-m-l	475,35	-49,70	189,81	-19,17	665,15	30,54
0,8-m-m	458,91	-32,71	167,99	19,89	626,90	52,60
0,8-m-p	461,06	-23,01	164,44	21,54	625,50	44,56
0,8-p-l	496,59	-49,84	188,21	-19,11	684,79	30,73
0,8-p-m	480,15	-32,84	166,44	19,57	646,59	52,41
0,8-p-p	482,30	-23,15	162,81	21,01	645,11	44,16
0,4-l-l	475,27	-77,53	157,85	-26,09	633,13	51,44
0,4-l-m	458,84	-60,54	138,22	12,06	597,05	72,60
0,4-l-p	460,98	-50,84	135,73	12,26	596,72	63,10
0,4-m-l	487,20	-47,25	156,47	-9,44	643,67	37,81
0,4-m-m	470,76	-30,26	137,06	15,72	607,82	45,98
0,4-m-p	472,91	-20,56	134,69	15,80	607,60	36,36
0,4-p-l	508,44	-47,39	156,00	-8,55	664,43	38,84
0,4-p-m	492,00	-30,39	136,71	16,17	628,71	46,56
0,4-p-p	494,15	-20,70	134,38	16,04	628,53	36,74
0,25-l-l	489,91	-79,77	145,13	-17,95	635,03	61,82
0,25-l-m	473,47	-62,78	130,29	9,50	603,76	72,28
0,25-l-p	475,62	-53,08	128,54	9,38	604,15	62,46
0,25-m-l	501,83	-49,49	144,34	-6,00	646,17	43,49
0,25-m-m	485,39	-32,49	129,64	11,59	615,03	44,09
0,25-m-p	487,54	-22,80	127,94	11,63	615,48	34,43
0,25-p-l	523,07	-49,63	143,87	-5,10	666,93	44,52
0,25-p-m	506,63	-32,63	129,25	11,72	635,88	44,35
0,25-p-p	508,78	-22,94	127,55	11,71	636,33	34,65
0,1-l-l	551,62	-91,46	136,60	-8,83	688,22	82,64
0,1-l-m	535,19	-74,47	124,31	6,39	659,50	80,85
0,1-l-p	537,33	-64,77	122,74	6,24	660,07	71,01
0,1-m-l	563,55	-61,18	136,11	-1,75	699,66	59,43
0,1-m-m	547,11	-44,18	123,88	7,54	670,99	51,72
0,1-m-p	549,26	-34,49	122,35	7,57	671,61	42,06
0,1-p-l	584,78	-61,32	135,75	-1,17	720,53	60,15
0,1-p-m	568,35	-44,32	123,63	7,65	691,98	51,97

0,1-p-p	570,49	-34,63	122,10	7,65	692,60	42,28
---------	--------	--------	--------	------	--------	-------