



Rui Jorge Henriques dos Ramos

DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO COM ESTRUTURA METÁLICA LEVE

THERMAL AND ENERGY PERFORMANCE OF LIGHTWEIGHT STEEL FRAME HOUSING

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelos Professores Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

Coimbra, 05 de fevereiro de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

Rui Jorge Henriques dos Ramos

Desempenho térmico e energético de edifícios de habitação com estrutura metálica leve

Thermal and energy performance of lightweight steel frame housing

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelos Professores Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

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

Coimbra, 05 de fevereiro de 2018

AGRADECIMENTOS

Neste espaço deixo um agradecimento às pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para esta fase final da minha vida académica.

Aos Professores Doutora Andreia Pereira e Doutor Paulo Santos, por todo o apoio e conhecimento transmitido, pela sua orientação, por toda a sua disponibilidade, e pela forma amigável que sempre me receberam. À Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil (DEC).

Aos meus colegas de curso, por toda a ajuda prestada, toda a amizade, todos os momentos, todas as noites em claro, pela motivação e aconselhamento que me foram dando ao longo deste caminho. Um especial agradecimento a quem esteve mais perto de mim no decorrer desta dissertação, ao Kevin Costa, à Patrícia Reis, ao Diogo Cardoso e ao Nuno Rosa.

Queria realçar um enorme agradecimento que tenho a fazer aos grandes Luís Silva e Márcia Lopes, por toda esta amizade que criámos, todos os momentos únicos que partilhámos, todas as histórias que ficaram marcadas, todas as noites, toda a ajuda que me deram, todo o conhecimento partilhado, toda a motivação e críticas que me foram dando ao longo destes anos. Sem vocês este curso não teria sido a mesma coisa. Amizades que ficam para a vida!

Aos amigos que fiz durante as viagens para Coimbra, que moraram comigo, e que tenho de infância, em especial ao Pedro Franco.

A toda a minha família que me motivou para o terminar desta fase, que me deu apoio e confiança. Aos meus grandes Pais, pois sem eles nada disto teria sido possível, ajudaram-me e continuam a ajudar-me em tanto, que não tenho palavras para descrever esta enorme gratidão que sinto por eles. O meu amor por vocês é enorme. Obrigado.

À minha namorada, por toda a paciência e espera, por todo o apoio, por toda a motivação e preocupação. Contigo tudo se torna mais fácil. Estás sempre no meu coração.

Por fim, não queria deixar de agradecer à minha Avó Francelina, que infelizmente já não está entre nós, por toda a sua ajuda, por todo o amor, por toda a sua preocupação. Ficarás marcada para sempre na minha vida.

RESUMO

A utilização de estruturas leves em aço, do inglês “*Light Steel Framing*” (LSF), na construção de edifícios, para habitação, tem vindo a aumentar nos últimos anos um pouco por toda a Europa, mas também em Portugal. Estas estruturas utilizam como principal material resistente o aço galvanizado que, por sua vez, apresenta diversas vantagens relativamente às estruturas tradicionais em betão armado e alvenaria de tijolo, designadamente o baixo peso, a rapidez de construção, elevada resistência e durabilidade, flexibilidade arquitetónica e baixos impactos ambientais.

Com o intuito de avaliar o desempenho térmico e energético de um edifício de habitação unifamiliar com estrutura leve de aço enformado a frio, teve-se como referência uma habitação de construção tradicional (betão armado e alvenaria de tijolo) construída em Portugal. Para essa avaliação foi utilizada a metodologia de cálculo prevista no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), (Decreto-Lei n.º 28/2016 de 23 de junho).

Compararam-se três métodos de cálculo do coeficiente de transmissão térmica U para a construção em LSF. Posteriormente, este coeficiente relativo à construção em LSF foi ajustado por forma a que seja igual à construção tradicional, para que a análise do desempenho energético dependa apenas de outros fatores, como por exemplo a inércia térmica, do fator de ganhos η , do fator global máximo admissível dos vãos envidraçados $g_{Tmáx}$, e da área das superfícies, mais concretamente as paredes. Realizou-se uma comparação energética entre os dois sistemas construtivos, para a determinação das necessidades anuais de “energia” do edifício, particularmente os ganhos e as perdas térmicas, e a correspondente classificação energética.

Nesta dissertação, concluiu-se que tanto na estação de arrefecimento como na estação de aquecimento, a estrutura em LSF apresenta um consumo energético superior à construção tradicional, admitindo valores de U iguais. Estas diferenças situaram-se em cerca de 11% de maiores necessidades relativas à energia útil para aquecimento e 73% relativas à energia útil para arrefecimento. Relativamente às necessidades nominais anuais globais de energia primária, a construção em LSF apresenta cerca de 64% de maiores necessidades comparativamente à construção tradicional.

Palavras-chave: LSF, REH, Desempenho Térmico, Desempenho Energético, Inércia Térmica

ABSTRACT

The use of Lightweight Steel Framing (LSF) structures in residential buildings has been increasing in recent years, a bit throughout all Europe, but also in Portugal. These structures use galvanized steel profiles as main resistant material which, in turn, presents several advantages over the traditional reinforced concrete structures and brick masonry, namely lightness, construction speed, high resistance and durability, architectural flexibility and low environmental impacts.

In order to evaluate the thermal and energy performance of a LSF single-family residential building, a traditional reinforced concrete and brick masonry building built in Portugal was used as reference. For this assessment, the calculation methodology provided by the Regulation on the Energy Performance of Residential Buildings (REH) was used, (Decree-Law no. 28/2016 of June 23).

Three methods for the calculation of the thermal transmission coefficient U for the LSF elements were subjected to comparison. Posteriorly, this coefficient relative to the LSF construction system was adjusted in order to equalize the traditional construction, so that the energy performance analysis only depends on other factors, such as thermal inertia, gain factor η , maximum glazed spans global factor g_{Tmax} , and surface areas, more specifically walls. An energy comparison between the two building systems was carried out to determine the “energy” annual building requirements, particularly the thermal gains and losses, and the corresponding energy classification.

In this dissertation, it was concluded that in both the cooling and heating seasons, the LSF structure shows a higher energy consumption than the traditional one, when using the same U-value. These differences stood at about 11% higher heating energy needs and 73% cooling. Regarding the annual nominal primary energy, the LSF construction system presents about 64% greater needs, compared to the traditional one.

Key words: LSF, REH, Thermal Performance, Energy Performance, Thermal Inertia

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento geral.....	1
1.2	Objetivos do trabalho	2
1.3	Estrutura da dissertação	2
2	O SISTEMA CONSTRUTIVO EM LSF	3
2.1	Evolução histórica	3
2.2	Descrição do sistema LSF	4
2.2.1	Materiais estruturais.....	5
2.2.2	Materiais não estruturais	6
2.3	Vantagens e Desvantagens	7
2.4	Métodos de construção em LSF.....	8
2.5	Classificação do sistema em LSF.....	12
3	DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO	14
3.1	Desempenho térmico	14
3.1.1	Coeficiente de Transmissão Térmica.....	19
3.1.2	Pontes térmicas lineares	21
3.1.3	Inércia térmica	23
3.2	Desempenho energético.....	25
3.2.1	Regulamentação.....	28
4	CASO DE ESTUDO	34
4.1	Caracterização do edifício	34
4.1.1	Zonamento climático	34
4.1.2	Identificação das envolventes.....	35
4.1.3	Vãos envidraçados	36
4.1.4	Dispositivos de sombreamento e obstruções.....	37
4.1.5	Pontes térmicas lineares	37
4.1.6	Determinação do coeficiente de redução de perdas.....	39
4.1.7	Sistemas técnicos	39
4.2	Construção tradicional.....	40
4.2.1	Ponte térmica plana.....	42

4.2.2	Classe de inércia térmica.....	43
4.3	Construção em LSF.....	43
4.3.1	Ponte térmica plana.....	46
4.3.2	Classe de inércia térmica.....	46
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	47
5.1	Comparação dos valores de U	47
5.2	Análise energética	49
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
	ANEXOS.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Representação do sistema construtivo em LSF.	4
Figura 2.2- Secções transversais dos perfis estruturais de LSF (adaptado de Soares <i>et al.</i> , 2017).	5
Figura 2.3- Fixações na construção em LSF (adaptado Soares <i>et al.</i> , 2017).	6
Figura 2.4- Gráfico referente aos custos totais de cada sistema de construção (Andrade, 2016).	8
Figura 2.5 - Construção “Stick-Build” (Grubb <i>et al.</i> , 2001).	9
Figura 2.6- Construção por painéis (Grubb <i>et al.</i> , 2001).	10
Figura 2.7- Construção modular (Davison e Owens, 2014).	11
Figura 2.8- Construção por módulos (Grubb <i>et al.</i> , 2001).	11
Figura 2.9- Métodos de construção a) “Balloon Framing” e b) “Platform Framing” (adaptado Luxenburg R., 2009).	12
Figura 2.10- Classificação do tipo de construção em LSF (Santos <i>et al.</i> , 2012).	13
Figura 3.1 – Comparação de espessuras para obter o mesmo nível de resistência térmica (adaptado Silvestre <i>et al.</i> , 2013).	14
Figura 3.2- Estudo de custo comparando os dois métodos (adaptado Franco e Alves, 2006).	17
Figura 3.3- Comparação do desempenho térmico dos diferentes tipos de parede em LSF (Santos <i>et al.</i> , 2012).	18
Figura 3.4- Método de cálculo do R_{max} (adaptado Doran e Gorgolewski, 2002).	19
Figura 3.5- Método de cálculo do R_{min} (adaptado Doran e Gorgolewski, 2002).	20
Figura 3.6- Representação dos caminhos de fluxo de calor.	20
Figura 3.7- Representação das incógnitas d e s (adaptado Santiago <i>et al.</i> , 2012).	21
Figura 3.8- Imagem termográfica de moradia em construção tradicional durante a estação fria, Coimbra (Simões <i>et al.</i> , 2017).	22
Figura 3.9- Esquema representativo do efeito de inércia térmica num edifício (adaptado, Verbeke e Audenaert, 2017).	24
Figura 3.10- Classes energéticas de edifícios (Adene, 2017).	26
Figura 3.11- Etiquetagem de uma janela (SEEP, 2017).	27
Figura 4.1- Alçados da habitação em estudo.	34
Figura 4.2- Identificação das envolventes na habitação.	35
Figura 4.3- Sombreamentos por elementos horizontais e verticais.	37
Figura 4.4- Pormenor construtivo de ligações (adaptado ITeCons, 2011).	38
Figura 4.5- Pormenor da caixa de estore (Plastimar, 2011).	42
Figura 4.6- Vista exterior e interior de uma parede em LSF.	44
Figura 4.7- Representação do pormenor construtivo da cobertura exterior.	44
Figura 5.1- Comparação das necessidades globais anuais de energia útil em [kWh/(m ² .ano)] e comparação das necessidades globais anuais de energia primária em [kWh _{ep} /m ² .ano].	50
Figura 5.2- Perdas térmicas na construção tradicional e em LSF na estação de aquecimento.	51

Figura 5.3- Ganhos térmicos na construção tradicional e em LSF na estação de arrefecimento.	54
Figura 5.4- Comparação dos ganhos solares e ganhos internos brutos na estação de arrefecimento.	55
Figura A.1- Representação da parede exterior.	64
Figura A.2- Representação da parede de separação com a garagem.	64
Figura A.3- Representação da parede de separação com o espaço não útil (sótão).	65
Figura A.4- Representação da cobertura.	65
Figura A.5- Representação da laje de esteira.	66

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1- Equipamentos escolhidos numa primeira fase (Futureng, 2017).....	15
Quadro 3.2- Equipamentos escolhidos numa segunda fase (Futureng, 2017).	16
Quadro 3.3- Resultado das várias soluções para os dois tipos de construção (Futureng, 2017).	16
Quadro 3.4- Coeficientes de transmissão térmica Ψ (REH, 2016).....	23
Quadro 3.5- Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência (adaptado Portaria n. °379-A/2015).	30
Quadro 3.6- Quadro de redução de perdas de espaços não úteis (Despacho n.º 15793-K/2013).	31
Quadro 3.7- Fator solar global máximo (adaptado Portaria n. °349-B/2013).	32
Quadro 4.1- Dados climáticos da estação de aquecimento da cidade de Aveiro.	35
Quadro 4.2- Dados climáticos da estação de arrefecimento da cidade de Aveiro.....	35
Quadro 4.3- Medição das divisões da habitação.	36
Quadro 4.4- Levantamento dimensional.	36
Quadro 4.5- Pontes térmicas lineares exteriores.....	38
Quadro 4.6- Pontes térmicas lineares interiores.	39
Quadro 4.7- Valores b_{tr} dos espaços não úteis.....	39
Quadro 4.8- Caracterização dos elementos da construção tradicional.	41
Quadro 4.9- Massas volúmicas dos materiais de construção tradicional.	43
Quadro 4.10- Caracterização da construção em LSF.....	45
Quadro 4.11- Massas volúmicas dos materiais de construção em LSF.	46
Quadro 5.1- Comparação do cálculo de U através da norma ISO 6946 e do THERM.	47
Quadro 5.2- Aproximação de U à construção tradicional com variação da espessura de lâ de rocha.....	48
Quadro 5.3- Comparação entre os três métodos de cálculo de U	49
Quadro 5.4- Parâmetros energéticos referentes à construção tradicional.	49
Quadro 5.5- Parâmetros energéticos referentes à construção em LSF.	50
Quadro 5.6- Comparação das perdas térmicas entre a construção tradicional e em LSF, na estação de aquecimento.....	51
Quadro 5.7- Ganhos térmicos na estação de aquecimento.....	52
Quadro 5.8- Comparação das perdas térmicas entre a construção tradicional e em LSF, na estação de arrefecimento.	53
Quadro 5.9- Comparação dos ganhos térmicos na construção tradicional e em LSF, na estação de arrefecimento.	53
Quadro 5.10- Resumo da comparação de ganhos na estação de aquecimento [kWh/ano].	54
Quadro 5.11- Resumo da comparação de ganhos na estação de arrefecimento [kWh/ano]. ...	55
Quadro B.1- Cálculo do U segundo o método (Gorgolewski, 2007).	67

SIMBOLOGIA

- a - Parâmetro em função da inércia térmica de um edifício [$W/°C$]
 A_i - Área do elemento que separa o interior do espaço não útil [m^2]
 A_p - Área útil do pavimento [m^2]
 A_u - Área do elemento que separa o espaço não útil do exterior [m^2]
 b_{tr} - Coeficiente de redução de perdas [adimensional]
 d - Comprimento da alma de um perfil [mm]
 F_h - Fator de sombreamento do horizonte por obstruções exteriores [adimensional]
 F_f - Fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado [adimensional]
 F_g - Fração envidraçada [adimensional]
 F_o - Fator de sombreamento por elementos horizontais sobrejacentes ao envidraçado [adimensional]
 g - Fator solar de vãos envidraçados [adimensional]
 g_T - Fator solar global do vão envidraçado com os dispositivos de proteção solar ativados [adimensional]
 g_{Tmax} - Fator global máximo admissível dos vãos envidraçados [adimensional]
 g_{Tvc} - Fator solar de vãos envidraçados com dispositivos de proteção [adimensional]
 $g_{v,i}$ - Fator solar do vidro para uma incidência solar normal ao vão [adimensional]
 I_t - Inércia térmica [kg/m^2]
 M_{si} - Massa superficial útil do elemento i [kg/m^2]
 N_i - Valor máximo das necessidades anuais de energia útil para aquecimento [$kWh/(m^2.ano)$]
 N_{ic} - Necessidades nominais de energia útil para aquecimento [$kWh/(m^2.ano)$]
 N_r - Valor máximo das necessidades nominais anuais de energia primária [$kWh_{EP}/(m^2.ano)$]
 N_{rc} - Necessidades nominais globais anuais de energia primária [$kWh_{EP}/(m^2.ano)$]
 N_v - Valor máximo das necessidades anuais de energia útil para aquecimento [$kWh/(m^2.ano)$]
 N_{vc} - Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento [$kWh/(m^2.ano)$]
 p - Incógnita para o cálculo da resistência térmica total [adimensional]
 Q_a - Necessidades de energia útil para preparação de AQS [kWh/ano]
 Q_{pr} - Dispersão térmica [$kWh/24h$]
 R_i - Resistência térmica da camada i do elemento construtivo [$m^2.°C/W$]
 R_{max} - Limite superior de resistência térmica [m^2K/W]
 R_{min} - Limite inferior de resistência térmica [m^2K/W]
 R_{ph} - Taxas de renovação de ar [h^{-1}]
 R_{se} - Resistência térmica superficial exterior [$m^2.°C/W$]
 R_{si} - Resistência térmica superficial interior [$m^2.°C/W$]
 R_T^{-1} - Resistência térmica do elemento [m^2K/W]

s - Espaçamento entre perfis [mm]

S_i -Área da superfície interior do elemento i [m²]

U - Coeficiente de transmissão térmica [W/(m².°C)]

U_g - Coeficiente de transmissão térmica através de elementos em contato com o solo [W/(m².°C)]

U_{ref} - Coeficiente de transmissão térmica superficial de referência [W/(m².°C)]

U_w - Coeficiente de transmissão térmica superficial através de envidraçados [W/(m².°C)]

U_{wdn} - Coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite [W/(m² °C)]

α - Coeficiente de absorção solar [adimensional]

ΔU_g - Perdas de calor adicionais causadas por aberturas de ar [W/m²K]

ΔU_f - Perdas de calor adicionais causadas pela penetração de fixações metálicas no isolamento [W/m²K]

η - Fator de utilização de ganhos térmicos [adimensional]

Ψ - Coeficiente de transmissão térmica linear [W/(m.°C)]

ABREVIATURAS

AISI- Instituto Americano de Ferro e Aço
AQS- Águas Quentes Sanitárias
AVAC- Aquecimento, ventilação e ar condicionado
CBE1- Cobertura Exterior
CBI1- Laje de Divisória com o Sótão
CEE- Comunidade Económica Europeia
COP- Coeficiente de Desempenho
EER- Índice de Eficiência de Energia
EN- Norma Europeia
ENU- Espaços Não Úteis
EPS- Poliestireno Expandido
ETICS- Sistema de Isolamento Térmico pelo Exterior
EUA- Estados Unidos da América
FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
HUD- “Department of Housing and Urban Development”
INE- Instituto Nacional de Estatística
ITeCons- Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade
ITE- Informação Técnica de Edifícios
LSF- “Lightweight Steel Framing”
NAHB- “National Association of Home Builders”
NUTS- Nomenclatura das Unidades Territoriais para fins estatísticos
OSB- “Oriented Strand Board”
PCMs- Materiais de Mudança de Fase
PDE1- Parede Exterior
PDI1- Parede Interior de Separação com a Garagem
PDI2- Parede Interior de Separação com o Sótão
PVI1- Pavimento Interior
RCCTE- Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
REH- Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
SCE- Sistema Nacional de Certificação Energética de Edifícios
SEEP- Sistema de Etiquetagem Energética de Produtos
UE- União Europeia
V0E1- Porta Exterior
VRF- Volume de Refrigerante Variável

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

Os edifícios são responsáveis por 40% da energia consumida na UE (Quercus, 2009) e por cerca de 10% das emissões diretas de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera (Soares *et al.*, 2017). Mesmo antes de 2013, Portugal enfrentava uma crise económica (Jornal de Construção, 2013), que se repercute até aos dias de hoje. Verificando-se estes factos, procura-se construções alternativas com a aplicação de medidas de desenvolvimento sustentável, como as medidas de eficiência energética que são aplicadas em edifícios desde a sua conceção até ao seu fim de vida útil. A otimização do desempenho térmico nos edifícios e do desempenho energético dos equipamentos promove a redução de consumos que por sua vez diminui as emissões de CO₂ para a atmosfera.

Uma forma de construção alternativa é a estrutura leve em aço (LSF, do inglês “*Lightweight Steel Framing*”). Este tipo de solução construtiva oferece inúmeras vantagens, tais como: baixo custo, bom desempenho térmico e acústico, rapidez de construção, fácil transporte e reciclabilidade (sustentabilidade) (Andrade, 2016).

Este sistema construtivo de aço enformado a frio, utiliza como principal material resistente o aço galvanizado. É principalmente utilizado em edifícios de pequeno porte não superiores a 3 pisos (habitações unifamiliares e coletivas, armazéns e reabilitações), na execução de lajes, coberturas, paredes interiores e exteriores (Ferreira, 2014).

É de salientar que em Portugal não existe, até ao momento, nenhum documento que estabeleça regras de construção em LSF. Sendo aplicado até hoje o mesmo regulamento que os Estados Unidos, ou mesmo das próprias empresas que comercializam este tipo de sistema, como é o caso da Steel-Portugal, Futureng, entre outras que fornecem apoio e formação às empresas que se iniciam neste sistema de construção (Luís M., 2013). Também a compreensão do desempenho térmico e energético encontra-se pouco analisada, devido à ainda pequena utilização deste sistema construtivo em Portugal. Nesta dissertação pretende-se dar um contributo para uma melhor compreensão do desempenho térmico e energético desta solução.

Para avaliar o desempenho energético dos edifícios, são necessários diversos parâmetros, especificados ao longo da dissertação, que podem ser obtidos através da metodologia de cálculo do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), (Decreto-Lei n.º 28/2016), (Versão V2.25, de 03 de junho de 2016). O REH reconhece todas as

especificações técnicas de cada tipo de edifício naquilo que é mais relevante para a caracterização e melhoria dos desempenhos térmico e energético.

1.2 Objetivos do trabalho

Nesta dissertação visa-se a avaliação e comparação do desempenho térmico e energético de um edifício de habitação unifamiliar com estrutura leve em aço enformado a frio (LSF), tendo como referência uma habitação de construção tradicional (betão armado e alvenaria), construída em Portugal (Aveiro). Para a realização deste estudo será utilizada a metodologia de cálculo prevista no REH.

Numa primeira fase são desenvolvidas soluções construtivas em LSF cujo desempenho térmico se aproximou do conferido pela solução tradicional. Numa segunda fase, é feita uma avaliação do desempenho térmico e energético do edifício em LSF tendo como referência o comportamento da construção tradicional.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

O primeiro capítulo faz o enquadramento temático e apresenta os objetivos e a estrutura da presente dissertação.

O segundo capítulo, apresenta um pequeno resumo da história da construção em LSF, descrevendo os materiais presentes neste tipo de construção em termos de estruturais e não estruturais. São também referidas as vantagens e desvantagens deste sistema, bem como os seus métodos de construção e a referida classificação em termos da posição do isolamento térmico nos diversos elementos construtivos.

O terceiro capítulo apresenta alguns conceitos teóricos do desempenho térmico e energético dos edifícios, referindo também a atual regulamentação em vigor.

O quarto capítulo é dedicado ao caso de estudo. É feito o enquadramento, caracterização e constituição dos dois tipos de construção analisadas: construção tradicional e construção em LSF.

O quinto capítulo contém a análise dos resultados obtidos no capítulo anterior.

O sexto capítulo apresenta a conclusão dos resultados e sugere alguns tópicos para possíveis trabalhos futuros.

2 O SISTEMA CONSTRUTIVO EM LSF

2.1 Evolução histórica

O sistema construtivo LSF “*Lightweight Steel Framing*” foi desenvolvido nos EUA no Século XIX, utilizando modelos protótipos de pequenas habitações que utilizavam chapas perfiladas autoportantes. Quando se deu o período da Segunda Guerra Mundial, houve um maior desenvolvimento deste tipo de construção devido à necessidade de transportar e construir instalações simples e rápidas, como foi o caso da base militar na ilha de Saint Thomas, Ilhas Virgens, no Mar das Caraíbas. (Silvestre *et al*, 2013).

Após esta Guerra, a quantidade de aço existente era notória e as empresas tinham adquirido bastante experiência na utilização do metal. Começaram então por utilizar nas divisórias de edifícios de habitação com a intenção de mais tarde utilizar em todo o edifício, substituindo assim as estruturas de madeira usuais utilizadas na altura (Futureng, 2017).

A explosão da construção residencial em LSF deu-se no Japão no final da década de 40 e na década de 50, devido à quantidade de habitações destruídas pela guerra. Como o custo da madeira era bastante elevado, recorreu-se à utilização destas estruturas leves. Outro grande impulso foi dado nos anos 80 quando as grandes florestas foram restritas à indústria madeireira, levando a grandes oscilações no preço desta matéria-prima. No entanto, não afetou os EUA (Futureng, 2017).

Com o crescimento da economia Asiática e do Médio Oriente na década de 90, o preço do aço atingiu mínimos históricos, o que levou o mercado da construção em LSF a subir novamente, ao mesmo tempo que movimentos de âmbito ecológicos realizavam campanhas contra o abate de árvores para as construções em madeira. Levando a Austrália e os EUA a obterem um crescimento no mercado da construção em LSF (Silvestre *et al.*, 2013).

No ano de 1992 aconteceu uma enorme catástrofe nos EUA, um devastador ciclone de nome Andrew, destruiu várias habitações maioritariamente construídas em madeira desde o Norte das Bahamas até ao Sul da Flórida. Após dois anos desta catástrofe, o centro de investigação da Associação Nacional de Construção Habitacional (NAHB- National Association of Home Builders) dos EUA, preparou dois relatórios que apresentavam alternativas à construção em madeira, nomeadamente estruturas LSF, ao Departamento de Habitação e Desenvolvimento Urbano (HUD- Department of Housing and Urban Development). Este tipo de estruturas iria permitir construções habitacionais com menores riscos de colapso acompanhados de baixos custos.

Em 1994, o Instituto Norte-Americano do ferro e do Aço (AISI- American Iron and Steel Institute), o HUB e a NAHB, iniciam um trabalho conjunto que se veio a designar por “método prescritivo”. Este método permitia a unificação de procedimentos e regras de execução aos construtores, ao mesmo tempo que concedia a utilização de novos materiais para utilizações não estruturais, possibilitando requisitos padronizados e consistentes aos consumidores e fornecedores do aço enformado a frio (Silvestre *et al.*, 2013).

Na Europa, o crescimento deste mercado tem ocorrido sobretudo na Dinamarca, Suécia e Reino Unido. Relativamente a Portugal, pode-se dizer que a procura por construções deste tipo tem vindo a aumentar gradualmente comparando com as construções em alvenaria. Desde 1993 que a construção de estruturas leves tem vindo a crescer, contrariando um pouco a tradição de construções em betão. Com a crise económica que Portugal ainda atravessa neste momento, muitas das empresas nacionais especializadas em LSF tiveram que se virar para o mercado internacional como forma de evitar a falência.

2.2 Descrição do sistema LSF

O sistema construtivo LSF, é um sistema constituído apenas por materiais secos (Burstrand, 1998), como perfis de aço enformados a frio, placas de gesso cartonado e de OSB, e isolamento térmico como a lã de rocha ou poliestireno expandido/extrudido (Soares, 2017). A Figura 2.1 mostra a secção transversal de uma parede com o sistema construtivo em LSF.

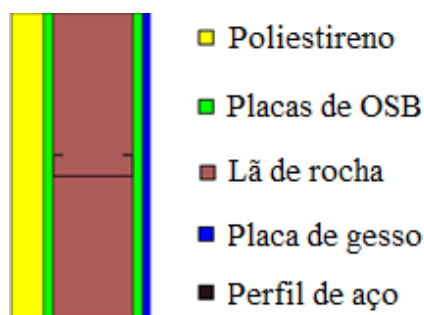


Figura 2.1- Representação do sistema construtivo em LSF.

Normalmente, a ordem correta de trabalhos para uma construção em LSF deve ser a seguinte (Batista e Ghavami 2005):

- Executar as fundações;
- Montar os perfis de LSF;
- Montar a cobertura;
- Executar as paredes exteriores;

- Executar as instalações hidráulicas, elétricas;
- Executar as paredes interiores;
- Instalar as caixilharias das janelas e portas;
- Revestir as paredes e pisos;
- Instalar os equipamentos necessários;
- Pintura interna e externa.

Os materiais pertencentes ao sistema construtivo em LSF podem ser classificados como materiais estruturais e materiais não estruturais.

2.2.1 Materiais estruturais

Os materiais considerados estruturais numa construção em LSF são o aço, as chapas perfiladas, e as fixações (especialmente os parafusos auto-perfurantes e auto-roscantes), podendo também ser consideradas as placas OSB para efeitos de funções estruturais. Relativamente aos perfis estruturais, estes são obtidos a partir de chapas de aço que variam entre 1,5mm e 4mm (LSK, 2005), que pode variar dependendo do fabricante e do local para a aplicação do aço. Estes perfis, representados na Figura 2.2, apresentam normalmente uma forma de secção transversal em *U*, *C*, ou *Z*, sendo também espaçados de 60 em 60cm (Silvestre *et al.*, 2013). Como em Portugal o mercado relativo ao LSF ainda apresenta uma baixa procura, as empresas de forma a diminuir os custos logísticos e de armazenagem, reduziram a oferta em quatro secções de aço em *C*, o aço *C90*, *C150*, *C200* e *C250*, ambos com uma aba de 43mm (Futureng, 2017). Relativamente ao caso de estudo, abordado no capítulo 4, apenas foram utilizados perfis em *C*, mais concretamente os perfis *C150* e *C200*, de forma a uniformizar ao máximo a estrutura.



Figura 2.2- Secções transversais dos perfis estruturais de LSF (adaptado de Soares *et al.*, 2017).

De forma a minimizar a corrosão e aumentar a durabilidade, as chapas de aço são fabricadas segundo a norma EN1993-1-3 do Eurocódigo 3, sendo estas revestidas por uma camada de zinco. Relativamente às ligações entre peças (ligação perfil-perfil, ligação perfil-OSB), assumem um papel bastante importante na interligação de peças e na distribuição de cargas e esforços. Para isso é necessária uma boa escolha do tipo de fixação, que dependerá essencialmente da espessura dos materiais que irão ser atravessados, do local de montagem, do custo, da durabilidade e das condições necessárias ao suporte da força de conexão (LSK, 2005). Os elementos de fixação mais comuns são os parafusos auto-perfurantes (Santos *et al.*, 2012). São bastante utilizados pregos, um método designado de “clinchng”, ou seja, “soco” hidráulico,

rebites, soldaduras, cavilhas, cliques e colagens (Ferreira, 2014). A Figura 2.3 mostra vários processos de fixação entre dois perfis LSF e um painel OSB com um perfil LSF.

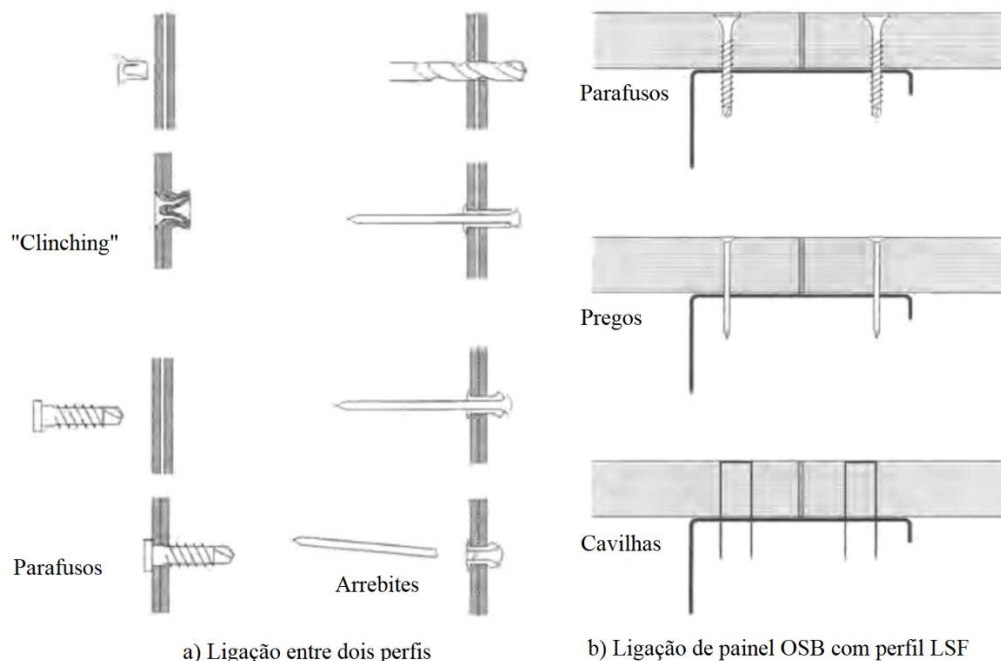


Figura 2.3- Fixações na construção em LSF (adaptado Soares *et al.*, 2017).

2.2.2 Materiais não estruturais

Como materiais não estruturais numa estrutura em LSF, temos a lã de rocha, o sistema composto por isolamento térmico exterior (ETICS), e as placas OSB e de gesso cartonado.

Lã de rocha

A lã de rocha é um material constituído por fibras aglomeradas com resinas orgânicas e óleos impermeabilizantes, que resultam numa massa idêntica à lã (Futureng). A sua utilização na construção em LSF, é essencialmente para o preenchimento do espaço livre entre perfis e o fechamento vertical OSB ou gesso cartonado. É um material que proporciona uma maior resistência ao fogo no elemento LSF (Kesawan e Mahendran, 2015), um material isolante térmico (Soares *et al.* 2017) e também um material benéfico em termos de isolamento acústico (Patrício, 2003).

Sistema ETICS

O sistema ETICS, que é um isolamento constituído por placas de poliestireno expandido (EPS) ou extrudido (XPS), fixas à parte exterior da parede com fixações mecânicas ou cola. Estas placas são revestidas por um reboco delgado armado e normalmente um acabamento de um ligante sintético (Plastimar, 2011). O sistema ETICS é bastante adequado para minimizar as pontes térmicas (Martins *et al.*, 2016) devido à sua continuidade ao longo da envolvente,

favorecendo a inércia térmica, o isolamento térmico e consequentemente o conforto interior e a estética da habitação.

Placas “*Oriented Strand Board*” (OSB)

As placas OSB são constituídas por filamentos de madeira unidos com resinas prensadas a alta temperatura, orientados em três camadas perpendiculares de forma a aumentar a rigidez e a sua resistência mecânica (Masisa, 2003). Estas, devem seguir os requisitos da norma EN 12369-1. Como possuem um baixo coeficiente de condutibilidade térmica, complementam também o isolamento térmico na estrutura (Moreira, 2012).

Placas de gesso cartonado

As placas de gesso cartonado são principalmente utilizadas para revestimentos interiores. Os seus principais constituintes são: o gesso, a água e a celulose, sendo estes revestidos por um papel “kraft”. Estas placas possuem uma enorme vantagem em termos de regulação do teor de humidade interior do espaço, conseguem absorver humidade quando a mesma está em excesso e conseguem devolver quando o ambiente está mais seco, controlando assim possíveis condensações (Ferreira, 2014).

2.3 Vantagens e Desvantagens

A construção metálica tem uma maior utilização na reabilitação de edifícios, em pavilhões industriais, estruturas rodoviárias e pontes. É uma excelente solução para o que se tem vindo a chamar de cidades do futuro, ou seja, edifícios habitacionais sustentáveis e versáteis na sua utilização (Silva, 2016). Segundo Santos *et al.*, (2012), o sistema construtivo LSF apresenta várias vantagens perante o sistema construtivo tradicional, sendo elas:

- Liberdade no projeto de arquitetura;
- Flexibilidade arquitetónica;
- Compatibilidade com outros materiais;
- Prazos de execução menores;
- Racionalização de materiais e mão de obra;
- Menor carga nas fundações;
- Melhor organização do estaleiro;
- Maior reciclabilidade;
- Garantia de qualidade;
- Precisão construtiva;
- Preservação do meio ambiente.

Ferreira (2014), ao fazer um estudo relativo ao sistema em LSF na sua dissertação, concluiu que investir neste tipo de construção torna-se numa mais valia a longo prazo, devido a uma boa

qualidade dos elementos construtivos, ao elevado desempenho desta solução construtiva, e à redução de consumos energéticos para a climatização do edifício em LSF. Andrade (2016), no seu estudo de comparação de custos entre a construção LSF e tradicional, chegou à conclusão que a solução em LSF apresenta melhores condições económicas e sustentáveis, apesar de possuir um custo superior (devido ao aço) na sua fase inicial (Figura 2.4), mas que a médio longo prazo se torna uma solução menos dispendiosa do que a construção tradicional. Torna-se menos dispendiosa devido aos gastos energéticos serem inferiores e assim considerada uma solução mais “amiga” do ambiente, contendo a vantagem de apresentar menos desperdícios e a reutilização dos seus materiais em fim de vida útil. A Figura 2.4 representa o gráfico referente à evolução dos custos totais para os dois métodos de construção, segundo Andrade (2016).

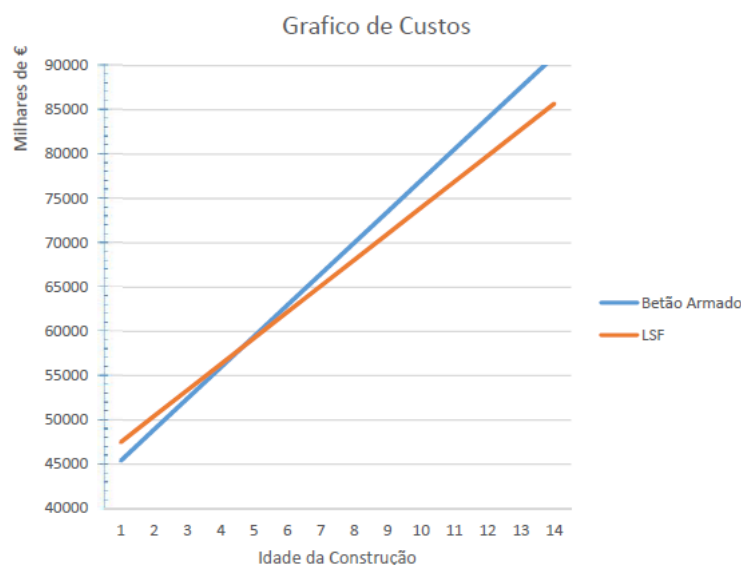


Figura 2.4- Gráfico referente aos custos totais de cada sistema de construção (Andrade, 2016).

Como este sistema de construção em LSF não é perfeito, também apresenta os seus pontos fracos. Segundo Soares *et al.*, (2017), a alta condutibilidade térmica do aço pode levar à ocorrência de pontes térmicas significativas e com isto a criação de humidades por condensação. Como normalmente a construção em LSF apresenta uma inércia térmica fraca, pode levar à ocorrência de problemas relacionados com o conforto térmico, como por exemplo o sobreaquecimento da habitação no Verão, maiores flutuações diárias de temperatura e maiores necessidades de energia tanto para aquecimento como para arrefecimento.

2.4 Métodos de construção em LSF

Os edifícios construídos através do sistema LSF, conseguem corresponder a uma grande solicitação com a rapidez necessária, dado a pré-fabricação dos seus componentes, e a possibilidade de empilhar, acrescentar ou retirar módulos. Esta construção pré-fabricada pode processar-se por três métodos de construção: construção tradicional “stick-built construction”,

construção em painéis “panelised systems” e construção modular “modular construction”, (Santos *et al.*, 2012).

a) Construção “Stick-built”

Neste método de construção “Stick-Built” (Figura 2.5), todo o trabalho de construção é realizado em obra. A montagem dos elementos estruturais no local, perfis montados e aparafusados no chão, e posteriormente erguidos de forma a formar um esqueleto estrutural capaz de receber os revestimentos interiores e exteriores (Grubb *et al.*, 2001). Este é o tipo de construção mais utilizado em todo o mundo no que toca a construção em LSF.

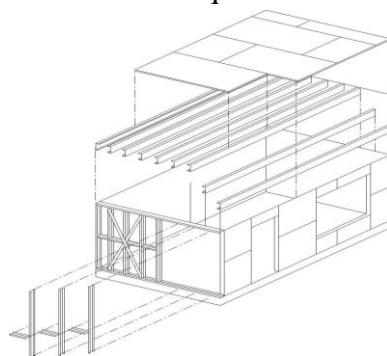


Figura 2.5 - Construção “Stick-Build” (Grubb *et al.*, 2001).

As principais vantagens deste processo são as seguintes (SCI, 1997):

- Permitir maiores tolerâncias construtivas;
- Maior eficiência no transporte dos elementos;
- Dispensável fábrica de pré-fabricação e máquinas de movimentação de cargas (gruas).

b) Construção por painéis

Este é um processo de pré-fabricação em que os painéis das paredes, dos pisos e das coberturas são produzidos em fábrica. Posteriormente, os painéis são transportados até ao local da obra onde serão conectados aos restantes painéis. Contrariamente ao método anterior, é possível que os painéis venham logo com revestimento interior, exterior e até mesmo isolamento. É necessário ter uma especial atenção ao método de fixação e travamento dos painéis de forma a evitar desagregação ou deformação das peças (Futureng, 2017). A Figura 2.6 representa um exemplo construtivo por painéis.

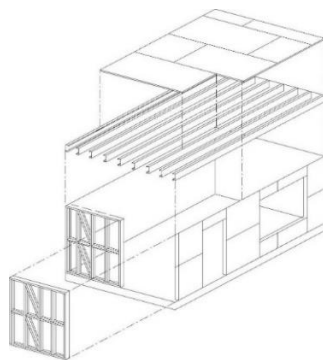


Figura 2.6- Construção por painéis (Grubb *et al.*, 2001).

As principais vantagens deste processo são as seguintes (SCI, 1997):

- Redução significativa dos custos no local da obra;
- Controlo de qualidade dos produtos fabricados;
- Maior rapidez de construção.

c) **Construção modular**

Na construção modular, como se observa na Figura 2.7, as unidades são pré-fabricadas em fábrica e posteriormente transportadas e montadas em obra, exceto as fundações que possuem um processo construtivo ainda semelhante à construção tradicional. No local da obra as unidades devem ser organizadas lado a lado e em altura (Grubb *et al.*, 2001). Este tipo de construção permite erguer simultaneamente os pisos, as paredes, os tetos e as coberturas, mas cada uma destas fases apenas poderá ser iniciada quando a anterior estiver concluída (Futureng, 2017). Com esta forma de construção modular, pode ser retirado ou acrescentado módulos habitacionais, ou até mesmo alterar a sua disposição ao longo da sua vida útil, acompanhando assim as necessidades de cada utilizador (Lee e Kim, 2014). A Figura 2.8 representa um exemplo construtivo por módulos.

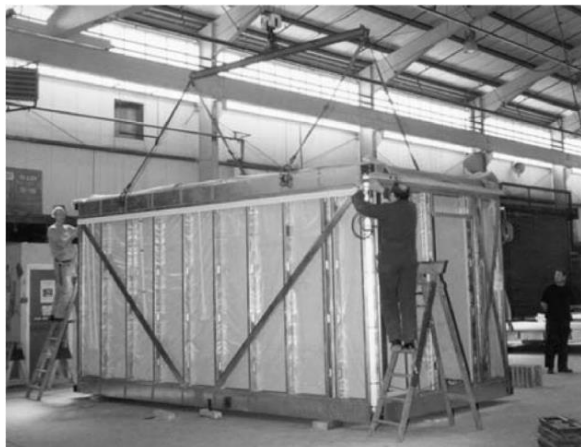


Figura 2.7- Construção modular (Davison e Owens, 2003).

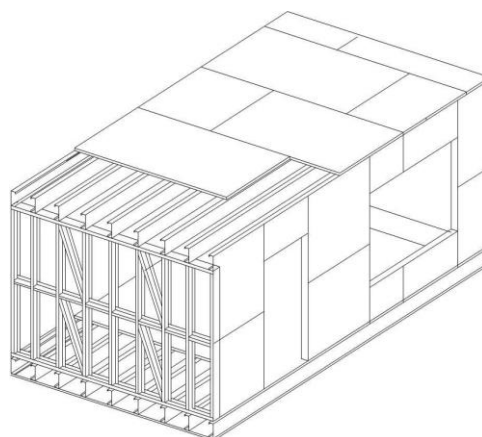


Figura 2.8- Construção por módulos (Grubb *et al.*, 2001).

As principais vantagens deste processo são as seguintes (Santos *et al.*, 2012):

- Custos de construção reduzidos;
- Menor tempo de construção em obra;
- Aumento da rentabilidade da indústria devido à economia da escala de fabricação;
- Maior produtividade;
- Maior rigor na previsão do tempo de construção e do orçamento a fornecer;
- Menor desperdício dos materiais em obra;
- Melhor qualidade de construção.

Construção “Platform Framing” e “Ballonn Framing”

O método de construção “Stick-Built” pode ser dividido em dois processos distintos (Grubb *et al.*, 2001).

- “Platform Framing” – Na construção por plataforma, as paredes e os pisos são construídos por níveis, ou seja, é construída uma base que é utilizada como plataforma para projetar o próximo andar. Em algumas construções, as cargas das paredes do piso superior são transmitidas pelas vigas para as paredes do piso inferior, visto que as paredes não são estruturas contínuas.
- “Balloon Framing” – São utilizados painéis de parede contínuos em mais que um andar, estes devem ser apoiados temporariamente até que os pavimentos sejam montados. A

estrutura de um piso é fixa na lateral dos elementos verticais de suporte de carga. A principal vantagem deste método é o facto de as cargas provenientes dos pisos superiores serem transmitidas diretamente para as paredes do piso inferior.

No esquema da Figura 2.9 pode observar-se as diferenças entre estes dois métodos de construção.

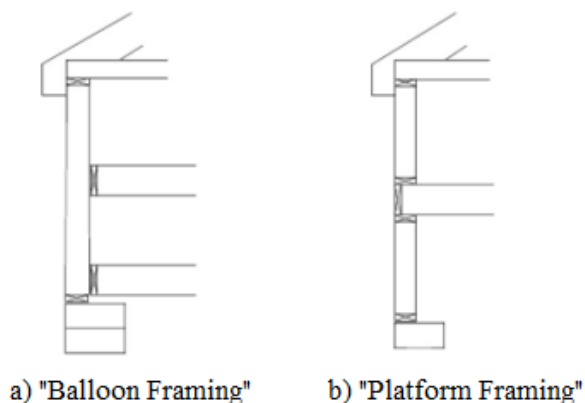


Figura 2.9- Métodos de construção a) “Balloon Framing” e b) “Platform Framing” (adaptado Luxenburg, 2009).

2.5 Classificação do sistema em LSF

A construção em LSF consegue obter coeficientes de transmissão térmica baixos nas paredes, nos telhados e nos pisos devido aos isolamentos térmicos. Existem atualmente diversos isolamentos térmicos sendo neste trabalho apenas utilizados a lã de rocha, o poliestireno expandido ou o poliestireno extrudido. Dependendo do posicionamento deste isolamento nos diversos componentes, a construção em LSF pode ser classificada como: fria, híbrida ou mista, e quente (Santos *et al.*, 2012).

Construção do tipo “fria”

Tipo de construção onde todo o isolamento térmico se encontra entre os elementos metálicos, e assim terá um maior risco de ocorrência de condensações intersticiais devido à baixa temperatura no interior dos elementos da estrutura. Este tipo de construção não será a melhor opção para os climas mais frios.

Construção do tipo “híbrida ou mista”

O isolamento nesta forma de construção será repartido entre o interior das paredes e o seu exterior. Pelo menos um terço do isolamento deve ser contínuo e colocado no exterior dos perfis o que leva à minimização de pontes térmicas.

Construção do tipo “quente”

É o tipo de construção em que não há isolamento entre os perfis, mas apenas no seu exterior. É a melhor opção para reduzir o risco de condensação intersticial. De forma a exemplificar estes três tipos de classificação de construção, segue-se a Figura 2.10.

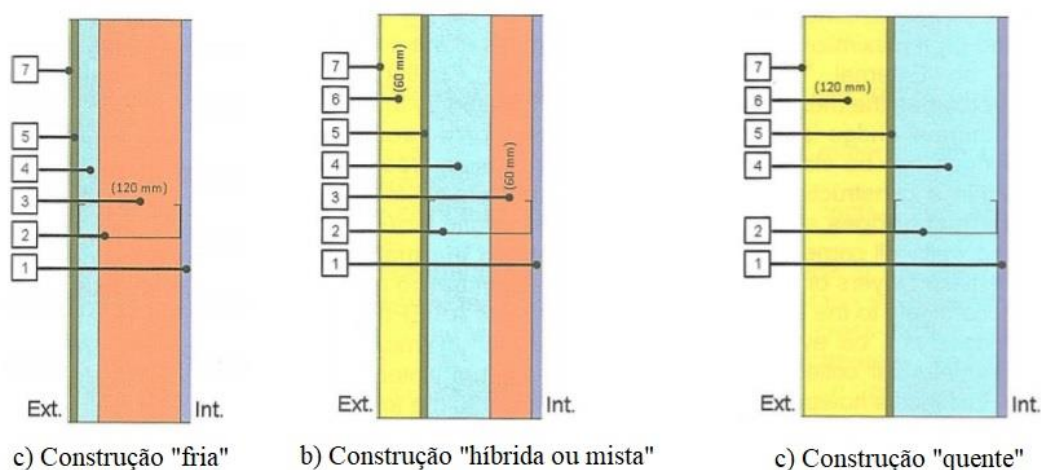


Figura 2.10- Classificação do tipo de construção em LSF (Santos *et al.*, 2012).

A legenda de cada número apresenta-se descrita da seguinte forma:

- 1- Placas de gesso cartonado de 15mm;
- 2- Perfil metálico C150;
- 3- Lã de rocha em a) de 120mm b) 60mm;
- 4- Caixa de ar variável;
- 5- Painéis de OSB;
- 6- Poliestireno expandido em b) 60mm c) 120mm;
- 7- Acabamento final ETICS de 3mm.

3 DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO

3.1 Desempenho térmico

O desempenho térmico de um edifício depende principalmente do clima onde se encontra, da forma como este será construído e da utilização que se pretende dar. Todas as interações entre os diferentes edifícios e mesmo a interação entre o espaço urbano e o clima de uma cidade influenciam o desempenho térmico de um edifício (Panão, 2008). Em termos de construção, o isolamento térmico de uma habitação é um fator bastante importante no seu desempenho. Os materiais de construção de cada edifício devem ser selecionados de forma a reduzir as oscilações de temperatura e de humidade a que são sujeitos. Os perfis mais utilizados nas construções em LSF possuem cerca de 1,5mm de espessura e encontram-se espaçados no máximo de 60cm. Segundo, Silvestre *et al.*, (2013), junto ao teto e ao chão de um edifício LSF existe 1,5mm de ponte térmica que corresponde à espessura das almas dos canais superiores e inferiores que interrompem o isolamento térmico. Excluindo estes canais, o isolamento térmico é assegurado pela lã de rocha, mas também com grande contributo o OSB e o polistireno situados na parte exterior. Posto isto, a percentagem de superfície com pontes térmicas (excluindo os canais) é no máximo 0,375%, enquanto que os restantes 99,625% de área estão devidamente isolados. Pode-se afirmar que uma habitação convencional construída em tijolo comum teria que possuir paredes com 86 cm de espessura para obter o mesmo nível de isolamento térmico que 4,5 cm de lã de rocha assegura numa parede em LSF, como se pode observar na Figura 3.1 (Silvestre *et al.*, 2013).

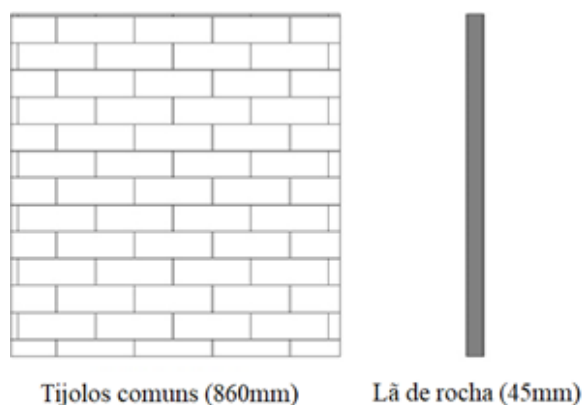


Figura 3.1 – Comparação de espessuras para obter o mesmo nível de resistência térmica (adaptado Silvestre *et al.*, 2013).

Um edifício construído em LSF, que por norma apresenta paredes pouco espessas, comparado a uma construção tradicional, é um edifício que apresenta normalmente uma fraca inércia

térmica. De forma a superar esta limitação e obter um bom comportamento térmico com estrutura leve, é essencial controlar variáveis como a dimensão e orientação dos vãos envidraçados, dispositivos de proteção solar e a capacidade isolante da envolvente construtiva. Quando um edifício possui uma ocupação não permanente, esta desvantagem de possuir uma fraca inércia térmica poderá tornar-se numa vantagem. Isto porque permite uma imediata climatização interior com recurso aos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado AVAC, que só necessitam de ser ativados nos momentos em que o edifício se encontra ocupado (Santos *et al.*, 2010).

Com o objetivo de perceber o impacto que o isolamento térmico teria numa construção em LSF e numa construção dita tradicional, a Futureng realizou dois estudos: o primeiro chamado de “Barraca A+” e o segundo de “Estudo Comparativo”.

O estudo “Barraca A+” segue a regulamentação do RCCTE (Decreto-Lei nº80/2006), e demonstra que o método construtivo de cada edifício é apenas uma variável do algoritmo que define a classe energética. Comparando habitações em LSF com habitações tradicionais, ambas com uma envolvente bem construída (bom desempenho), conclui-se que tal não é determinante para a sua classificação energética (por si só a envolvente exterior tem um contributo insuficiente para aumentar o desempenho). O fator determinante na avaliação deste requisito é a qualidade dos equipamentos escolhidos (Futureng, 2017).

O estudo comparativo visa comparar uma construção em LSF e uma construção dita tradicional, utilizando como exemplo um edifício com a mesma arquitetura e condicionantes, mas com a envolvente diferente (diferente desempenho térmico). Ou seja, nas paredes o coeficiente de transmissão térmica possui um valor de $0,23\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{°C}$ para a construção em LSF e de $0,49\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{°C}$ para a construção tradicional e a laje de esteira um $U=0,33\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{°C}$ e de $U=0,75\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{°C}$, respetivamente.

Numa primeira fase, como se pode observar no Quadro 3.1, escolheram-se os equipamentos para a climatização e produção de Águas Quentes Sanitárias (AQS) sem prestar especial atenção ao seu desempenho.

Quadro 3.1- Equipamentos escolhidos numa primeira fase (Futureng, 2017).

	Equipamento	Rendimento
Climatização Aquecimento	Resistência elétrica	$\eta=1$
Climatização Arrefecimento	Máquina frigorífica (ciclo de compressão)	$\eta=3$
AQS	Esquentador	$\eta=0.40$

Numa segunda fase, como se pode observar no Quadro 3.2, decidiu-se alterar os equipamentos tendo em conta um melhor rendimento.

Quadro 3.2- Equipamentos escolhidos numa segunda fase (Futureng, 2017).

	Equipamento	Rendimento
Climatização Aquecimento	Bomba de calor RCCTE	COP4
Climatização Arrefecimento		EER3
AQS	Termoacumulador a Gás	$\eta=0.80$

Obteve-se o Quadro 3.3 com os resultados relativos ao desempenho energético de ambas as situações. A situação 1 tendo em conta um fraco desempenho dos equipamentos e a Situação 2 com equipamentos de elevado rendimento, para os dois tipos de construção, LSF e tradicional.

Quadro 3.3- Resultado das várias soluções para os dois tipos de construção (Futureng, 2017).

Caraterísticas	LSF (Inércia Fraca)		Tradicional (Inércia Forte)	
	Situação 1	Situação 2	Situação 1	Situação 2
Nic/Ni (kWh/m ² .ano)	33.13/73.33	33.13/73.33	49.19/73.33	49.19/73.33
Nvc/Nv (kWh/m ² .ano)	14.01/32	14.01/32	13.63/32	13.63/32
Nac/Na (kWh/m ² .ano)	21.22/37.82	11.04/37.82	21.22/37.82	11.04/37.82
Ntc/Nt (kgep/m ² .ano)	2.92/6.05	1.32/6.05	3.38/6.05	1.44/6.05
Classificação energética	A	A+	B	A+

Como se pode observar, a construção em LSF devido ao isolamento que possui, necessita de menor quantidade de energia para o aquecimento da habitação durante o período de Inverno, Nic/Ni . Contrariamente, para o período de Verão a construção em LSF necessita de um pouco mais de energia do que a construção tradicional, Nvc/Nv , isto devido à fraca inércia térmica que este tipo de construção possui. Relativamente à produção de AQS, o método de construção não é significativo, logo o parâmetro Nac/Na mantém-se o mesmo em ambos os casos.

Para a determinação da classe energética, será o comportamento durante o período de Inverno que terá um maior peso na relação Ntc/Nt . Pois mesmo não escolhendo equipamentos com bom desempenho, a construção em LSF consegue obter uma classificação A. No caso da construção tradicional, como já verificado no estudo “Barraca A+”, o simples facto de melhorar o desempenho dos equipamentos, fará com que se passe de uma classificação energética de B para A+, o mesmo aplicado à construção LSF que com o aumento do rendimento dos equipamentos passou da classificação energética de A para A+ (Futureng, 2017). Em termos de

impacto económico relacionado com os custos anuais de aquecimento, arrefecimento e AQS, a construção em LSF apresenta um valor total cerca de 207,38€ para a segunda situação, enquanto que a construção tradicional apresenta um custo de 251,91€ (Futureng, 2017). A 27 de Outubro de 2006, Franco e Alves, (2006) estudou duas moradias com dois pisos e com uma área aproximada de 300m², uma em LSF e outra em construção tradicional. A Figura 3.2, apresenta os resultados em termos de custos de mão de obra, de materiais e do seu custo total.

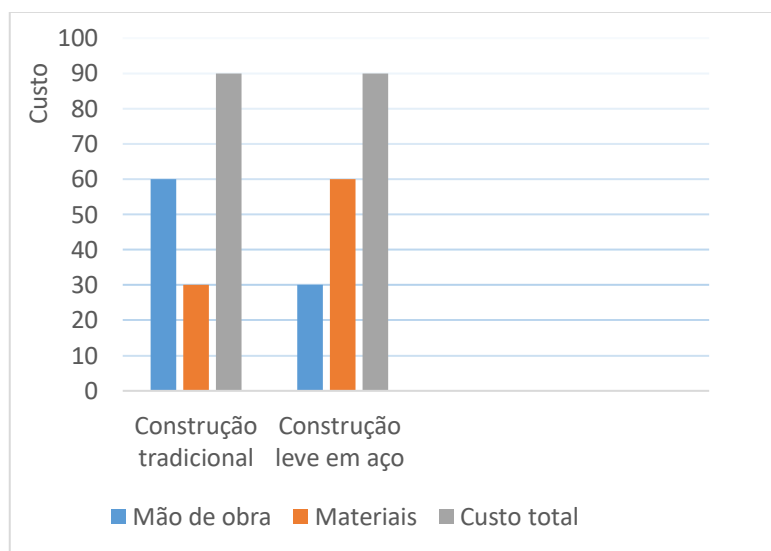


Figura 3.2- Estudo de custo comparando os dois métodos (adaptado Franco e Alves, 2006).

Como em qualquer tipo de solução construtiva, a construção em LSF também se pode dividir em duas componentes essenciais: o custo de mão de obra e o custo dos materiais (perfis de aço, lâ de rocha, parafusos, gesso cartonado, OSB, EPS). Normalmente uma construção leve em aço é influenciada pelo custo do aço, e é este o principal fator para o custo dos materiais do sistema LSF ser aproximadamente o dobro do sistema de betão armado e alvenaria. Em relação à mão de obra, o aço necessita de profissionais qualificados para este tipo de construção, no entanto, o período de execução é bastante inferior relativamente à construção tradicional, levando assim a um custo de mão de obra inferior representando cerca de 1/3 do custo total de obra. A partir deste estudo, conclui-se que no final ambas as construções irão ter o mesmo custo total, com a particularidade de se conseguir um prazo de execução inferior ao escolher a solução em LSF (Franco e Alves, 2006).

Outra componente relacionada com o desempenho térmico são as “pontes térmicas”. Estas pontes são zonas onde o isolamento térmico é interrompido por um perfil metálico, normalmente de 60 em 60cm (Futureng, 2017).

Segundo um estudo realizado por Santos *et al.*, (2010), é demonstrado o impacto que estes elementos em aço provocam numa parede vertical constituída por um painel simples de gesso cartonado, um perfil C90 preenchido totalmente por lã mineral, placa OSB de 11mm e um sistema ETICS de 33mm. Calculando o coeficiente de transmissão térmica na parede sem a utilização do perfil em aço obtém-se o valor de $U=0,210 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, enquanto que ao colocar o perfil em aço, o valor passa para $U=0,269 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Estes resultados foram obtidos através do software THERM (2003), (Santos *et al.*, 2010).

Foi realizado outro estudo numa parede, com o objetivo de estudar a influência dos perfis de aço e a variação do isolamento térmico EPS, relativamente ao coeficiente de transmissão térmica. Em que o cálculo de U sem o perfil de aço tinha o valor de $U=0,309 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, e com a aplicação do perfil em aço passaria a ter o valor de $U=0,385 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Verificando-se assim um aumento do coeficiente de transmissão térmica em 25% (Santos *et al.*, 2012). Gorgolewski, (2007) refere que ignorar o efeito do aço pode levar a uma sobrestimação da resistência térmica até cerca de 50%, dependendo dos detalhes da construção.

Foi testada a influência de possuir ou não isolamento e a sua variação de espessura no que diz respeito à temperatura e ao coeficiente de transmissão térmica (Figura 3.3).

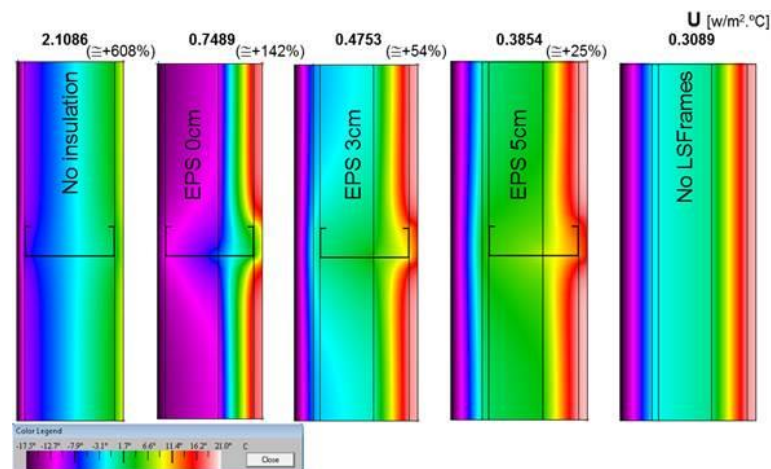


Figura 3.3- Comparação do desempenho térmico dos diferentes tipos de parede em LSF (Santos *et al.*, 2012).

Pode-se observar que o isolamento térmico é bastante importante relativamente à influência dos resultados referentes ao coeficiente de transmissão térmica, mas também para a limitação de pontes térmicas e para o controlo da distribuição de temperaturas no interior de uma parede. Ao diminuir o isolamento térmico, o U aumenta e a temperatura diminui na proximidade do aço, ou seja, nota-se perfeitamente a ocorrência da ponte térmica. Conclui-se assim que os

fenómenos de condensação são um fator bastante importante a ter em conta (Santos *et al.*, 2012).

3.1.1 Coeficiente de Transmissão Térmica

O coeficiente de transmissão térmica, U , representa a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária desse elemento da envolvente por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que o elemento separa (Futureng, 2017). Este é o inverso da resistência térmica. De acordo com a norma EN ISO 6946, o U pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se}} \quad (3.1)$$

onde:

R_{si} - Resistência térmica superficial interior [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$];

R_i - Resistência térmica da camada i do elemento construtivo [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$];

R_{se} - Resistência térmica superficial exterior [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$].

Ao utilizar a expressão (3.1), a norma EN ISO 6946 apenas permite calcular corretamente os coeficientes de transmissão térmica em construções de alvenaria ou de madeira, o que se torna um problema para saber o valor de U em construções LSF. De forma a contornar esta situação, poderá utilizar-se uma ferramenta de cálculo, THERM, desenvolvida pelo Lawrence Berkeley National Laboratory, para análise bidimensional de transferência de calor em componentes de edifícios através de uma análise numérica de transferência de calor por condução e radiação baseada no método dos elementos finitos. Também se pode aplicar o método desenvolvido por Gorgolewski (2007), adaptado da norma EN ISO 6946, com um erro previsto inferior a 3%, comparando com a modelação por elementos finitos, e de 8% para cerca de 52 construções avaliadas. Este método começa pelo cálculo dos limites de resistência térmica R_{max} e R_{min} . R_{max} calculado através de dois caminhos do fluxo de calor, um que passa apenas pelo isolamento (fluxo de calor (a)) e outro que atravessa no local do perfil de aço do elemento de construção (fluxo de calor (b)) (Figura 3.4). O R_{min} é calculado através da resistência de cada camada separadamente, isolamento térmico e perfil de aço, e após isso somado às restantes resistências das camadas do elemento de construção (Figura 3.5).



Figura 3.4- Método de cálculo do R_{max} (adaptado Doran e Gorgolewski, 2002).

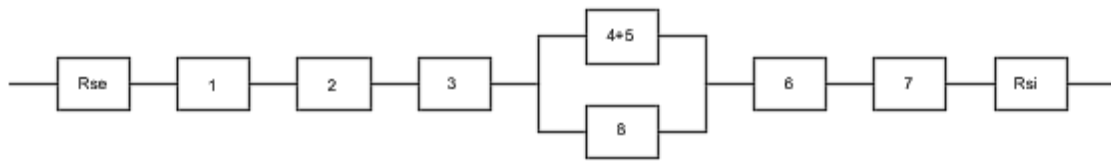


Figura 3.5- Método de cálculo do R_{min} (adaptado Doran e Gorgolewski, 2002).

Os números representados no interior de cada retângulo representam os vários constituintes, neste caso tomou-se como exemplo a parede exterior da habitação em LSF do caso de estudo, havendo uma diferenciação no (4+5) e (8) que indicam o fluxo de calor que atravessa apenas o isolamento e o fluxo de calor que atravessa o perfil de aço, respetivamente. O R_{se} representa a resistência térmica superficial do exterior e o R_{si} a resistência térmica superficial do interior da habitação. Apresenta-se a Figura 3.6 de forma a tornar mais explícita esta passagem do fluxo de calor por estes dois caminhos.

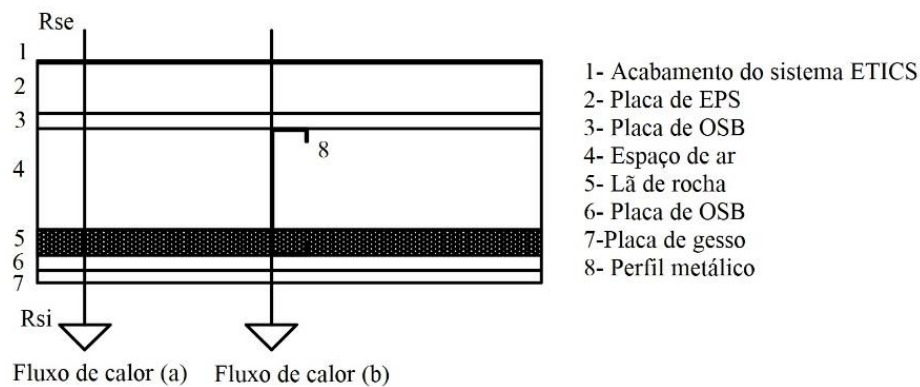


Figura 3.6- Representação dos caminhos de fluxo de calor.

Após o cálculo das resistências, calculado através da equação (3.1), utiliza-se a equação (3.2), que depende do tipo de construção em LSF (neste caso para uma construção híbrida) e da largura da aba do perfil estudado (se for ou não superior 50mm), que neste caso de estudo não excede.

$$p = 0,8 \frac{R_{min}}{R_{max}} + 0,32 - 0,2 \frac{600}{s} - 0,04 \frac{d}{100} \quad (3.2)$$

A variável s representa o espaçamento entre perfis em [mm] e d a largura da alma de um perfil em [mm], como representado na Figura 3.7. Para uma construção do tipo “quente” o valor de p é ajustado para 0,5 e para os restantes tipos, se o valor de p for negativo deve ser considerado zero.

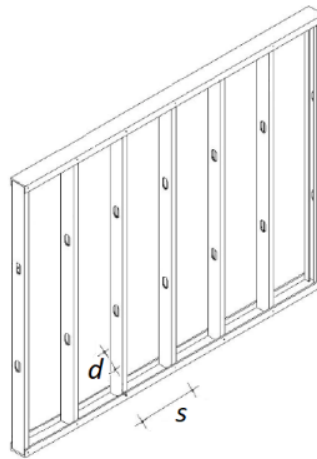


Figura 3.7- Representação das incógnitas d e s (adaptado Santiago *et al.*, 2012).

Esta fórmula de p , (eq. 3.2), vai depois permitir calcular a resistência térmica total R_T do elemento em estudo, segundo a fórmula (3.3). O valor final do coeficiente de transmissão térmica tem em conta correções ΔU_g e ΔU_f , que representam as perdas de calor adicionais causadas por espaços de ar e as perdas de calor adicionais causadas pela penetração de fixações metálicas no isolamento, respetivamente. Estas podem ser ignoradas, se somadas, obtiverem um resultado inferior a 3% de R_T^{-1} (Doran e Gorgolewski, 2002), o que foi o caso neste estudo. Assim, o resultado final pode ser obtido a partir da equação (3.4).

$$R_T = pR_{max} + (1 - p)R_{min} \quad (3.3)$$

$$U = \frac{1}{R_T} + \Delta U_g + \Delta U_f \quad (3.4)$$

3.1.2 Pontes térmicas lineares

As pontes térmicas são denominadas perdas de calor que ocorrem quando o isolamento é perfurado por um material cuja condutividade térmica é bastante superior aos restantes elementos da construção ou quando existe descontinuidade deste isolamento térmico. Ou seja, a ponte térmica é toda a parte da envolvente de um edifício onde as linhas de fluxo de calor deixam de ser retilíneas e passam a seguir direções onde a resistência à passagem do calor é menor, deixando de seguir um caminho unidirecional do fluxo de calor. Estas, segundo Way e Kendrick, (2008), podem ser causadas devido a:

- Geometria (cantos que proporcionam caminhos adicionais de fluxo de calor);
- Ligações (ligação entre o piso e a parede);
- Penetrações na envolvente construtiva (suporte de varandas);
- Elementos estruturais (padieiras);

- Execução deficiente.

Estas pontes térmicas podem ser identificadas usando a termografia infravermelha através de dispositivos de obtenção de imagens térmicas, estes permitem detetar diferenças de temperatura superficial num determinado objeto, como demonstrado na Figura 3.8.



Figura 3.8- Imagem termográfica de moradia em construção tradicional durante a estação fria, Coimbra (Simões e Mateus, 2017).

No exemplo mostrado acima, Figura 3.8, é possível observar temperaturas superiores (vermelho), ou seja, existe maiores perdas de calor pelas vigas, pilares, padieiras e vãos. Essas zonas representadas a vermelho correspondem às zonas de pontes térmicas. Segundo Santos *et al.*, (2010), uma construção em LSF possui algumas vantagens comparativamente com uma construção tradicional. Apesar do aço possuir uma condutibilidade térmica elevada, é fácil colmatar essa limitação com a utilização de revestimentos com baixa transmissão térmica nos pisos, paredes e coberturas. O uso de um sistema de revestimento ETICS permite minimizar pontes térmicas originadas pelos perfis de aço.

Outras soluções para minimizar esta existência de pontes térmicas, segundo Soares *et al.*, (2017), passa por simplificar a geometria das fachadas do edifício, colocar uma camada de isolamento térmico contínuo ao longo de todo o edifício tentando evitar ao máximo interrupções, colocar as portas e as janelas em contacto com o isolamento, e os parafusos escolhidos para o afixamento possuírem baixa condutividade térmica. Høglund e Burstrandb, (1998) tentou resolver o problema das pontes térmicas numa parede, aumentando a resistência térmica desta com a redução da área do perfil de aço, chegando a conclusão que o valor do coeficiente de transmissão térmica do elemento diminuía quando o comprimento do banzo do perfil também diminuía. Como não irá ser do contexto desta dissertação analisar especificamente as pontes térmicas lineares na construção em LSF, irá ser adaptada a tabela 07 do Despacho n.º 15793-k/2013.

Para a determinação do coeficiente de transmissão térmica linear, Ψ , é possível utilizar os catálogos de pontes térmicas, como o que é disponibilizado pelo instituto ITeCons (2017) ou as tabelas de valores por defeito disponibilizadas no REH (2016). Estes catálogos do ITeCons seguem a norma ISO 10211 e poderão dar valores com cerca de 20% de erro, e as tabelas do REH com cerca de 50% erro. Sendo estas tabelas de REH bem mais conservadoras (Simões *et al.*, 2017).

Os catálogos do ITeCons (2017) para obtenção do Ψ , são adequados apenas para construções em alvenaria de tijolo, alvenaria de pedra, madeira e betão, e não para a construção em LSF. Apesar das tabelas do REH não serem também adequadas para a construção em LSF, tendo em conta que não há uma alternativa que permita a sua fácil contabilização, optou-se pela utilização das mesmas de modo a permitir uma maior facilidade na comparação entre estes dois tipos de construção, tradicional e em LSF. Os valores por defeito da tabela do REH estão representados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4- Coeficientes de transmissão térmica Ψ (REH, 2016).

Tipo de ligação		Sistema de isolamento das paredes		
		Isolamento interior	Isolamento exterior	Isolamento repartido ou na caixa de ar de parede dupla
Fachada com pavimentos térreos		0,80	0,70	0,80
Fachada com pavimento sobre o exterior ou local não aquecido	Isolamento sob o pavimento	0,75	0,55	0,75
	Isolamento sobre o pavimento	0,10	0,50	0,35
Fachada com pavimento de nível intermédio ⁽¹⁾		0,60	0,15 ⁽²⁾	0,50 ⁽³⁾
Fachada com varanda ⁽¹⁾		0,60	0,60	0,55
Fachada com cobertura	Isolamento sob a laje de cobertura	0,10 ⁽⁴⁾	0,70	0,60
	Isolamento sobre a laje de cobertura	1,0	0,80	1,0
Duas paredes verticais em ângulo saliente		0,10	0,40	0,50
Fachada com caixilharia	O isolante térmico da parede contacta com a caixilharia	0,10	0,10	0,10
	O isolante térmico da parede não contacta com a caixilharia	0,25	0,25	0,25
Zona da caixa de estores		0,30	0,30	0,30

3.1.3 Inércia térmica

A inércia térmica de um edifício é a capacidade de este absorver calor na sua estrutura durante os períodos mais quentes e libertá-lo quando está mais frio, mantendo a temperatura interior mais estável ao longo do dia (Figura 3.9). Este fenómeno de inércia térmica é influenciado por

alguns fatores, incluindo o clima onde o edifício se encontra (Kossecka e Kosny, 2002), o tipo de isolamento térmico da envolvente do edifício (Stazi *et al.*, 2015), e do tipo de uso do edifício (Hoes *et al.*, 2009).

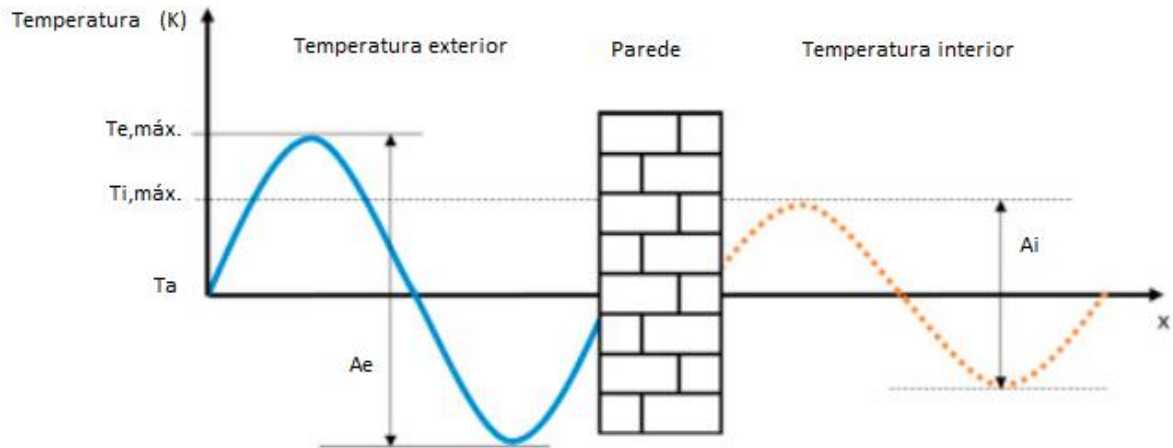


Figura 3.9- Esquema representativo do efeito de inércia térmica num edifício (adaptado, Verbeke e Audenaert, 2017).

Como se pode observar no esquema da Figura 3.9, a inércia térmica permite amortecer as variações de temperatura, mantendo-a mais estável no interior do edifício (linha a tracejado cor de laranja), portanto mais longe de valores extremos causadores de desconforto. A inércia térmica pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$I_t = \frac{\sum M_{si} S_i}{A_p} \quad (3.5)$$

onde:

M_{si} -Massa superficial útil do elemento i [kg/m^2];

S_i -Área da superfície interior do elemento i [m^2];

A_p - Área útil do pavimento [m^2].

Segundo o regulamento são definidas três classes de inércia térmica: forte, fraca e média. Como as estruturas em LSF possuem pouca massa térmica foram quantificadas usualmente como sendo de classe fraca, o que leva a pensar que o seu desempenho térmico não é o melhor. Mas, comparando com uma parede convencional com tijolos 15+11 com caixa de ar e isolamento, torna-se uma solução com menores necessidades de aquecimento, devido a um maior isolamento térmico (U inferior). Conseguem-se assim reduzir as perdas de calor e o custo de aquecimento devido ao elevado isolamento que as paredes LSF possuem (Futureng, 2017). Contrariamente a este tipo de construção em LSF, a construção dita tradicional possui uma classe de inércia térmica forte devido à sua massa térmica ser elevada, $I_t > 400 \text{ kg}/\text{m}^2$.

Como existe uma interação entre ganhos, perdas de calor, e também armazenamento nos materiais de construção, Verbeke e Audenaert, (2017) estudou o equilíbrio térmico de um edifício através de quatro fluxos principais de calor. O gerado internamente através de fontes como os ocupantes ou a iluminação artificial, o movimento de ar causado pela ventilação, o ganho de calor através dos elementos envidraçados do edifício e através da envolvente opaca do edifício. Chegando assim à conclusão que o efeito de inércia térmica poderá ter um impacto positivo relativamente ao conforto térmico em edifícios maciços, mas se apenas se tentar poupar na energia que se gasta, esta corresponde a uma parcela bastante inferior do que utilizar outras medidas de poupança de energia como o aumento de isolamento térmico do edifício, controlar os ganhos de calor e a sua ventilação (Verbeke e Audenaert, 2017). Uma forma de tentar ultrapassar a fraca inércia térmica na construção em LSF, seria a utilização de materiais de mudança de fase (PCMs). Estes materiais possuem uma baixa condutividade térmica e uma elevada capacidade de retenção de calor (Soares, 2017).

Para o cálculo da inércia térmica em elementos da envolvente exterior, interior, em contato com outra fração autónoma ou com edifício adjacente, o valor da massa superficial útil nunca pode ser superior a 150 kg/m^2 . Enquanto que para elementos de compartimentação interior, parede ou pavimento, a massa superficial útil não poderá ser superior a 300 kg/m^2 (Despacho n.º 15793-K/2013).

3.2 Desempenho energético

A legislação nacional para o regulamento de desempenho energético dos edifícios, visa a transposição da Diretiva n.º 2010/31/EU-EPBD para o Decreto-Lei n.º 118/2013, separando os edifícios de comércio e serviços (RECS) e os edifícios de habitação (REH). Relativamente aos edifícios de habitação, este regulamento permite determinar a classe de eficiência energética com base na comparação entre os casos de estudo e os parâmetros de referência impostos pelo regulamento. Este tem como principal objetivo melhorar o comportamento térmico, a eficiência dos sistemas técnicos e a minimização do risco de ocorrência de condensações superficiais na envolvente. Os principais parâmetros de referência são os seguintes:

Ψ - Coeficiente de transmissão térmica linear [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]

U - Coeficiente de transmissão térmica superficial através de elementos opacos [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]

U_g - Coeficiente de transmissão térmica através de elementos em contato com o solo [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]

R_{ph} - Taxas de renovação de ar [h^{-1}]

b_{tr} - Coeficiente de redução de perdas [adimensional]

α - Coeficiente de absorção solar [adimensional]

U_w - Coeficiente de transmissão térmica superficial através de envidraçados [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]

g- Fator solar de vãos envidraçados [adimensional]

A aplicação do regulamento em termos de edifícios de habitação destina-se essencialmente aos edifícios que serão construídos de novo e aos existentes que necessite de grande intervenção no que toca à sua envolvente ou aos sistemas técnicos. Também aos que necessitam de uma avaliação energética no âmbito do Sistema Nacional de Certificação Energética de Edifícios (SCE), que tem como objetivo informar acerca do desempenho energético dos edifícios, classificando-os de forma a que o consumidor final os possa comparar e escolher em função da sua classe energética. Apresentar um quadro que contenha medidas de melhoria propostas pelo perito que conduzam à melhoria da eficiência energética, do conforto e da suposta redução dos consumos de energia, e criar um documento único que contenha as componentes e os sistemas técnicos dos edifícios (Adene, 2017).

Esta classificação dos edifícios está dividida em 8 classes distintas, *A+*, *A*, *B*, *B-*, *C*, *D*, *E* e *F*. Em que a classe *A+* corresponde a um edifício com melhor desempenho energético e a classe *F* com o pior desempenho energético (Figura 3.10).



Figura 3.10- Classes energéticas de edifícios (Adene, 2017).

Os requisitos mínimos revistos após 1 janeiro de 2016 indicam que a classe energética mínima para edifícios novos é a *B* e para edifícios sujeitos a grandes intervenções é a classe *C* (Adene, 2017). Para a classificação do desempenho térmico das janelas, foi desenvolvido pela empresa ITeCons uma metodologia em conformidade com a norma ISO 18292 (2011). Esta metodologia tem em conta a zona climática, a classe de permeabilidade ao ar, o coeficiente de transmissão térmica da janela e o fator solar do envidraçado (SEEP, 2017). A classificação poderá ir da classe *A* à classe *G*, contendo uma possibilidade de expansão para produtos mais eficientes *A+* ou *A++*. A Figura 3.11 mostra um exemplo de uma etiquetagem de uma janela.



Figura 3.11- Etiquetagem de uma janela (SEEP, 2017).

A melhoria do desempenho energético dos edifícios pode ser alcançada através de soluções passivas, como por exemplo a escolhas dos materiais ou do isolamento na envolvente do edifício, e através de soluções ativas, como o uso de equipamentos AVAC mais eficientes. Após um estudo, Saffari *et al.*, (2016) afirma que é preferível investir em boas soluções passivas para melhorar a eficiência energética a longo prazo, reduzindo assim o gasto de energia para aquecimento e arrefecimento e melhorando as condições de conforto térmico da habitação.

Uma das ferramentas que pode ser utilizada para estimar os gastos de energia, é o *software* EnergyPlus (2017), que é um programa de simulação dinâmica com grande versatilidade e fiabilidade que utiliza modelos empíricos usando coeficientes de transferência, permitindo prever custos e consumos energéticos de um edifício. Aste *et al.* (2009), decidiu realizar um estudo com o objetivo de investigar a influência das paredes exteriores de um edifício, situado no norte de Itália, relativamente ao seu desempenho energético. Através de modelos de teste virtuais avaliou ambos os parâmetros (superfície de transferência de calor, controlo solar, taxas de ventilação e regime funcional do sistema AVAC) e comparou-os com um edifício de estudo, chegando à conclusão que, ao comparar os resultados da simulação do desempenho energético do edifício modelo com o edifício de estudo, conclui-se que a inércia térmica apresenta variações de cerca de 6% no aquecimento e de 21% no arrefecimento. A diferença entre a necessidade de um aquecimento com uma parede de baixa inércia em comparação com uma de elevada inércia pode atingir cerca de 10%, enquanto que a necessidade de arrefecimento já pode atingir cerca de 20%. Pode-se então afirmar que a utilização de paredes com elevada inércia térmica resulta numa redução de energia tanto para o aquecimento como para o arrefecimento, mas, quando esta é acoplada com outras medidas de poupança e com um uso racional e eficiente dos edifícios os resultados poderão ser bem melhores (Aste *et al.*, 2009).

Gervásio *et al.* (2010), realizou um estudo onde comparava qual seria o equilíbrio entre a energia incorporada e a energia operacional para vários níveis de isolamento, ao longo da vida útil de um edifício. A energia incorporada nos materiais não depende dos utilizadores do edifício, depende apenas da energia consumida relativa aos processos de fabrico, e a energia operacional referente à energia utilizada para aquecimento e arrefecimento. Deste estudo concluiu que a energia operacional possui um impacto muito significativo comparado com o impacto da energia total do ciclo de vida, cerca de 80%, sendo que seriam necessários cerca de 16 anos para que a energia operacional superasse a energia incorporada. Mas, ao melhorar o isolamento já necessitaria cerca de 23 anos para que a energia operacional superasse a incorporada (Gervásio *et al.*, 2010).

Andrade (2016) ao estudar o desempenho da construção tradicional e em LSF, obteve uma classificação energética *C* e uma classificação *B*, respetivamente. Resultando em cerca de 175,76 kWh/m².ano para o sistema de betão armado e 147,07 kWh/m².ano para o sistema de LSF, ou seja, uma diferença com cerca de 28,69 kWh/m².ano relativamente às necessidades anuais globais de energia primária dos dois sistemas (Andrade, 2016).

3.2.1 Regulamentação

De acordo com o Decreto-Lei 28/2016, a determinação da classe de eficiência energética é feita com base no comportamento do edifício em estudo estabelecendo parâmetros de referência. Estes parâmetros quantificam-se pelos seguintes índices fundamentais:

- Valor máximo das necessidades nominais anuais de energia primária N_i ;
- Valor máximo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento N_i ;
- Valor máximo das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento N_v ;

Para o cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil de aquecimento N_{ic} , somam-se as perdas de calor através da envolvente do edifício (pavimento, envidraçados, cobertura e paredes) $Q_{tr,i}$, com a transferência de calor por ventilação $Q_{ve,i}$, subtraindo os ganhos térmicos úteis resultantes dos ganhos solares através dos vãos envidraçados, da iluminação, dos equipamentos e dos ocupantes $Q_{gu,i}$ (eq. 3.6). O cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil para o arrefecimento N_{vc} , resulta da multiplicação do fator de utilização dos ganhos térmicos η_v com a soma dos ganhos térmicos totais brutos (ganhos internos de calor e ganhos solares) $Q_{g,v}$ (eq. 3.7), ambas as fórmulas estão a dividir pela área interior útil do pavimento do edifício A_p .

$$N_{ic} = (Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - Q_{gu,i})/A_p \text{ [kWh/(m}^2\text{.ano)]} \quad (3.6)$$

$$N_{vc} = (1 - \eta_v)Q_{g,v}/A_p \text{ [kWh/(m}^2\text{.ano)]} \quad (3.7)$$

O cálculo da transferência de calor através da envolvente do edifício pode ser feito através da expressão $Q_{tr,i}$ (eq. 3.8), que resulta da multiplicação do número de graus-dias de aquecimento para cada região GD , com o coeficiente global de transferência de calor por transmissão $H_{tr,i}$. Este coeficiente global por transmissão (eq. 3.9), representa a soma de transferência de calor através de elementos da envolvente em contato com o exterior H_{ext} (incluindo as pontes térmicas), em contato com os espaços não úteis H_{enu} , em contato com os edifícios adjacentes H_{adj} , e com elementos em contato com o solo H_{ecs} .

$$Q_{tr,i} = 0,024 \times GD \times H_{tr,i} \text{ [kWh]} \quad (3.8)$$

$$H_{tr,i} = H_{ext} + H_{enu} + H_{adj} + H_{ecs} \text{ [W/}^\circ\text{C]} \quad (3.9)$$

A transferência de calor por ventilação $Q_{ve,i}$ (eq. 3.10), é calculada através da multiplicação entre o número de graus-dias com o coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento $H_{ve,i}$. Este coeficiente $H_{ve,i}$ é calculado pela equação (3.11) através da multiplicação da taxa nominal de renovação de ar interior $R_{ph,i}$, com a área útil do pavimento A_p e o pé direito médio da fração P_d .

$$Q_{ve,i} = 0,024 \times GD \times H_{ve,i} \text{ [kWh]} \quad (3.10)$$

$$H_{ve,i} = 0,34 \times R_{ph,i} \times A_p \times P_d \text{ [W/}^\circ\text{C]} \quad (3.11)$$

A conversão dos ganhos térmicos brutos $Q_{g,i}$ para ganhos térmicos úteis $Q_{gu,i}$, faz-se de acordo com a equação (3.12), onde η_i representa o fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento. Os $Q_{g,i}$ provêm de duas origens, os ganhos térmicos associados a fontes internas de calor $Q_{int,i}$, e os ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar que é realizada pelos envidraçados $Q_{sol,i}$ (eq. 3.13).

$$Q_{gu,i} = \eta_i \times Q_{g,i} \text{ [kWh]} \quad (3.12)$$

$$Q_{g,i} = Q_{int,i} + Q_{sol,i} \text{ [kWh]} \quad (3.13)$$

As necessidades nominais de energia primária de um edifício de habitação N_{tc} , resultam da soma das necessidades nominais específicas de energia primária de aquecimento, arrefecimento, produção de AQS e ventilação mecânica, deduzidas de fontes de energia renovável conforme a seguinte expressão:

$$\begin{aligned}
N_{tc} = & \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{i,k} \cdot N_{ic}}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} \\
& + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{v,k} \cdot \delta \cdot N_{vc}}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} \\
& + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{a,k} \cdot Q_a / A_p}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} + \sum_j \frac{W_{vm,j}}{A_p} \cdot F_{pu,j} \\
& - \sum_j \frac{E_{ren,p}}{A_p} \cdot F_{pu,p}
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Para a determinação da classe energética do edifício, é calculado o quociente entre as necessidades nominais globais anuais de energia primária N_{tc} e o respetivo valor máximo regulamentar N_t .

Segundo a Portaria 379-A/2015 de 22 de outubro, os coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, U_{ref} , a partir de 1 de janeiro de 2016 para Portugal Continental foram os indicados no Quadro 3.5.

Quadro 3.5- Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência (adaptado Portaria n. °379-A/2015).

U_{ref} [W/(m ² ·°C)]		Zona Climática		
		Portugal Continental		
Zona corrente da envolvente:		A partir de 1 de janeiro de 2016		
		I1	I2	I3
em contacto com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} > 0.7$	Elementos opacos verticais	0,50	0,40	0,35
	Elementos opacos horizontais	0,40	0,35	0,30
em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} < 0.7$	Elementos opacos verticais	0,80	0,70	0,60
	Elementos opacos horizontais	0,60	0,60	0,50
Vãos envidraçados (portas e janelas) (U_w)		2,80	2,40	2,20
Elementos em contacto com o solo		0,50		

No caso de estudo desta tese, o edifício encontra-se na cidade de Aveiro, que pertence à zona I2. O coeficiente de redução de perdas, b_{tr} , na impossibilidade de conhecer com precisão a temperatura do espaço não útil, não segue a norma EN ISO 13789. O Quadro 3.6 representa o coeficiente de redução de perdas.

Quadro 3.6- Quadro de redução de perdas de espaços não úteis (Despacho n.º 15793-K/2013).

b_{tr}	$V_{enu} \leq 50m^3$		$50m^3 < V_{enu} \leq 200m^3$		$V_{enu} > 200m^3$	
	f	F	f	F	f	F
$A_i/A_u < 0,5$	1,0		1,0		1,0	
$0,5 \leq A_i/A_u < 1$	0,7	0,9	0,8	1,0	0,9	1,0
$1 \leq A_i/A_u < 2$	0,6	0,8	0,7	0,9	0,8	1,0
$2 \leq A_i/A_u < 4$	0,4	0,7	0,5	0,9	0,6	0,9
$A_i/A_u \geq 4$	0,3	0,5	0,4	0,8	0,4	0,8

Este coeficiente de redução de perdas é calculado através do quociente da área do elemento que separa o interior do espaço não útil, A_i , e a do elemento que separa o espaço não útil do exterior, A_u , do volume e do tipo de ventilação do espaço. Esta ventilação pode ser fraca “f”, sem aberturas, ou forte “F”, com aberturas. Para espaços não úteis fortemente ventilados o valor do b_{tr} é considerado 1 e para os edifícios adjacentes é considerado 0,6.

Para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear, todas as zonas que são consideradas pontes térmicas (pilares, vigas, caixas de estore) a partir de 1 de janeiro de 2016, possuíram um coeficiente de transmissão térmica calculado de forma unidimensional na direção normal à envolvente e que não seja superior a 0,9 W/m². °C (Portaria n.º 379-A/2015).

Para os valores representados no Quadro 3.5 é também importante salientar que os vãos não orientados a norte devem possuir a área de envidraçado superior a 5% da área do pavimento e todos os dispositivos de proteção solar, permanentes ou móveis ativados que obedeçam às seguintes condições:

Se a área de envidraçado for superior a 15% da área do pavimento:

$$g_t \cdot F_0 \cdot F_f \leq g_{Tm\acute{a}x} 0,15 / \left(\frac{A_{env}}{A_{pav}} \right) \quad (3.15)$$

Se for inferior a 15% da área do pavimento:

$$g_t \cdot F_0 \cdot F_f \leq g_{Tm\acute{a}x} \quad (3.16)$$

Onde, g_t , representa o fator solar global do vão envidraçado com os dispositivos de proteção solar ativados, F_0 o fator de sombreamento por elementos horizontais sobrejacentes ao envidraçado, F_f o fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado, e $g_{Tm\acute{a}x}$ o fator global máximo admissível dos vãos envidraçados que depende da classe de inércia térmica e da zona climática, (Quadro 3.7).

Quadro 3.7- Fator solar global máximo (adaptado Portaria n. °349-B/2013).

Classe de Inércia	V1	V2	V3
Fraca	0,15	0,10	0,10
Média	0,56	0,56	0,50
Forte	0,56	0,56	0,50

É de salientar que no caso de um vão envidraçado com alguma dimensão, principalmente orientado a Sul e sem proteção, podem surgir problemas relativos ao requisito mínimo.

No caso da construção tradicional do edifício em estudo, será uma classe de inércia forte e para a construção em LSF uma classe de inércia fraca. Segundo o Despacho n. °15793-F/2013 a cidade de Aveiro pertence à zona climática V2.

Quanto à taxa de renovação de ar, não seguindo a norma NP 1037, o valor da taxa de renovação de ar horária nominal durante o período de inverno deve ser igual ou superior a $0,4 \text{ h}^{-1}$. Na estação de arrefecimento o número de renovações horárias não deverá ser inferior a $0,6 \text{ h}^{-1}$.

Para os sistemas técnicos aplicam-se medidas de eficiência correspondentes ao aquecimento (COP) e ao arrefecimento (EER). Em que o coeficiente de desempenho (COP), representa o quociente entre a energia térmica fornecida por um aparelho e a energia elétrica consumida pelo sistema. Enquanto que o índice de eficiência de energia (EER), representa o quociente entre a potência da unidade em arrefecimento com a potência elétrica que essa unidade necessita para a execução do trabalho (Multisplit, 2017).

Segundo a Portaria n.º 349-B/2013, o valor de referência para o sistema de aquecimento que recorra a um equipamento de queima seria $\eta=0,89$. Para sistemas de ar condicionado a classe mínima de eficiência seria a B com o COP compreendido entre 3,60 e 3,40 para unidades split, multissplit e VRF, e entre 3,20 e 3,40 para unidades compactas. Para outros sistemas elétricos ou de não dispor de sistemas especificados $\eta=1$.

Os valores de referência de arrefecimento para sistemas de ar condicionado, devem possuir no mínimo classe B com EER compreendido entre 3,00 e 3,20 para unidades split, multissplit e VRF, e entre 3,00 e 2,80 para unidades compactas. Outros sistemas ou o caso de não dispor de sistemas especificados $\text{EER}=3,0$.

Para a produção de águas quentes sanitárias, no caso de o edifício dispor de sistema que recorra a equipamentos de queima, ou não possuir um sistema especificado com rede de gás, a eficiência de referência é $\eta=0,89$. Se for um sistema com produção térmica por bomba de calor,

segundo a Portaria 379-A/2015 deve ter um COP mínimo de 2,8, e se for outro tipo de sistema elétrico ou um sistema não especificado que não tenha rede de gás $\eta=0,95$.

Os sistemas de coletores solares térmicos devem possuir uma contribuição de energia renovável, E_{ren} , igual ou superior à calculada para um coletor solar padrão com as seguintes características: deve conter uma inclinação de 35° orientada a Sul, com uma área de abertura de $0,65 \text{ m}^2$ por ocupante, um rendimento ótico de 73%, com coeficientes de perdas térmicas $a_1=4,12 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{k})$ e $a_2=0,014 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{k}^2)$, e com um modificador de ângulo igual a 0,91 para uma incidência de 50° .

Segundo as normas EN 13229, EN 13240 e EN 14785, a eficiência mínima para recuperadores de calor deve ser igual ou superior a 0,75 (Decreto-Lei 26/2016).

4 CASO DE ESTUDO

4.1 Caracterização do edifício

O projeto em estudo refere-se a uma moradia unifamiliar localizada na periferia da zona urbana de Aveiro a 47 m de altitude e com uma distância da costa superior a 5 km. Esta é composta por um único piso, constituído por uma sala, zona de circulação, casa de banho, cozinha, dois quartos, garagem e um desvão de cobertura não habitado. A Figura 4.1 representa os alçados da habitação.

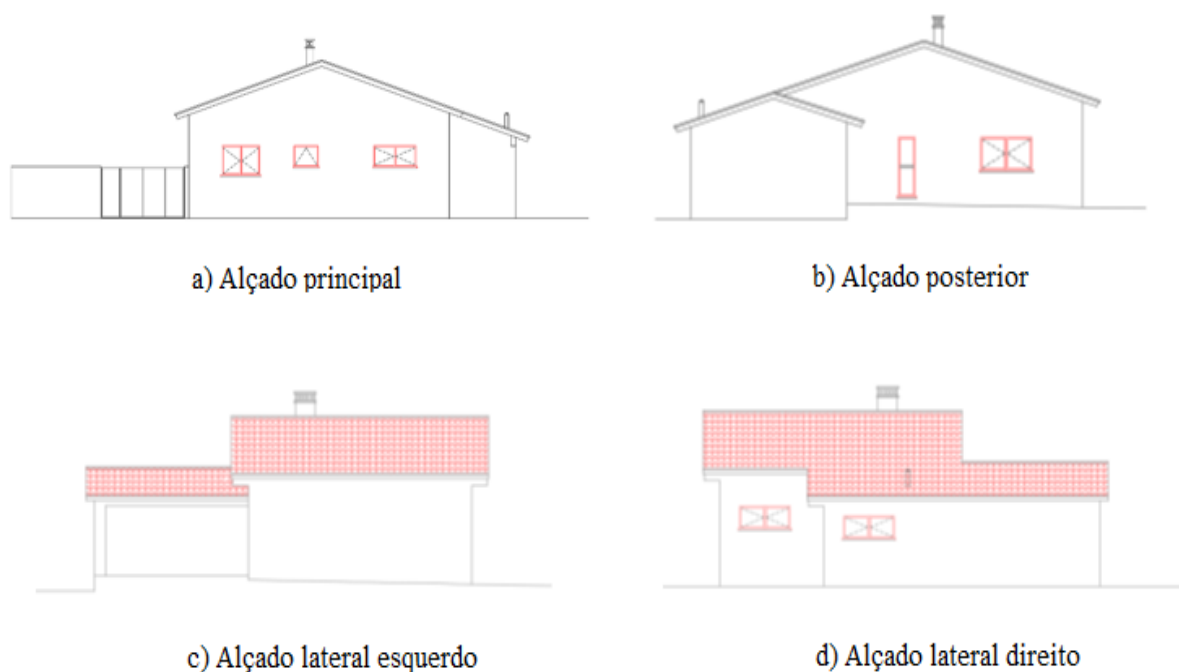


Figura 4.1- Alçados da habitação em estudo.

4.1.1 Zonamento climático

O zonamento climático do país baseia-se na Nomenclatura das Unidades Territoriais para fins estatísticos (NUTS) de nível III. Segundo o Despacho n.º 15793-F/2013, a cidade de Aveiro pertence à região do Baixo Vouga. Seguem, o Quadro 4.1 e o Quadro 4.2 que resumem os dados climáticos necessários para a aplicação na metodologia do REH.

Quadro 4.1- Dados climáticos da estação de aquecimento da cidade de Aveiro.

Zona climática de inverno	GD [°C]	M [meses]	$\theta_{ext,i}$ [°C]	Gsul [kWh/m ²]
I2	1337	6,3	9,5	140

Quadro 4.2- Dados climáticos da estação de arrefecimento da cidade de Aveiro.

Zona climática de verão	$\theta_{ext,v}$ [°C]	Isol [kWh/m ²]			
V2	20,6	N	S	E	W
		220	420	495	490

4.1.2 Identificação das envolventes

Foram também classificadas zonas úteis e zonas não úteis no edifício. As zonas não úteis são o vazio sanitário, a garagem e o desvão da cobertura, as restantes divisões (quartos, cozinha, sala, casa de banho e circulação no interior) foram classificadas como zonas úteis. Na Figura 4.2, representam-se a cor vermelha os elementos da envolvente exterior e a cor amarela os elementos da envolvente interior, em contacto com os espaços não úteis.

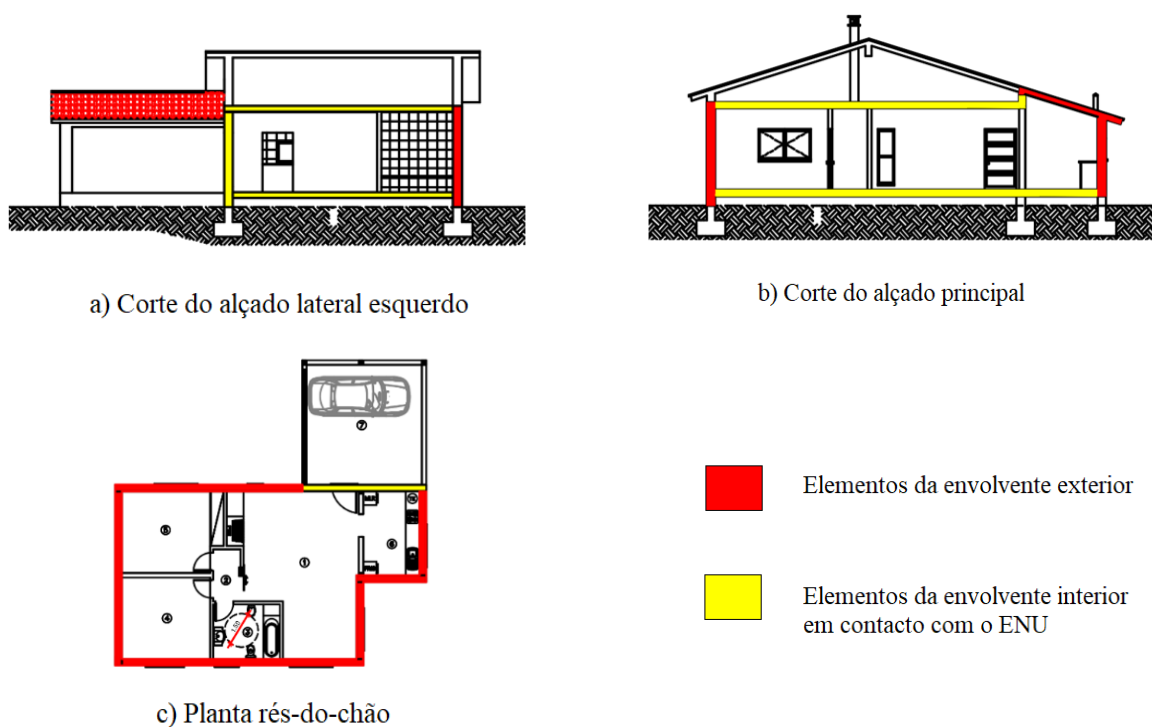


Figura 4.2- Identificação das envolventes na habitação.

As medições necessárias realizaram-se através do *Software* AutoCAD 2016 e estão dispostas nos quadros seguintes:

Quadro 4.3- Medição das divisões da habitação.

Divisão	Área [m ²]	Pé direito [m]
Quarto 1	14,04	2,7
Quarto 2	15,48	2,7
Circulação	2,76	2,7
Instalação sanitária	7,08	2,7
Sala	34,70	2,7
Cozinha	9,25	2,9
Garagem	30,25	2,2

Quadro 4.4- Levantamento dimensional.

	Área [m ²]
Útil do pavimento	83,31
Parede da envolvente exterior	88,24
Vãos envidraçados	8,96
Paredes interiores	55,40
Pavimento interior	87,30
Cobertura interior	77,70
Cobertura exterior	9,62

4.1.3 Vãos envidraçados

Os vãos envidraçados são constituídos por uma solução com vidro duplo, em que as proteções exteriores são compostas por persianas de réguas metálicas de cor clara, cujo fator solar g_{Tvc} teria o valor de 0,04. Este é um tipo de vidro incolor com uma espessura de 6 mm e 5 mm para o exterior e interior respetivamente, cujo valor do fator solar $g_{,vi}$, segundo o despacho n.º 15793-k/2013 é igual a 0,75. Na ausência de mais dispositivos de proteção, o fator solar global do envidraçado para vidro duplo calcula-se através da equação (4.1), cujo resultado é 0,04 (eq. 4.2).

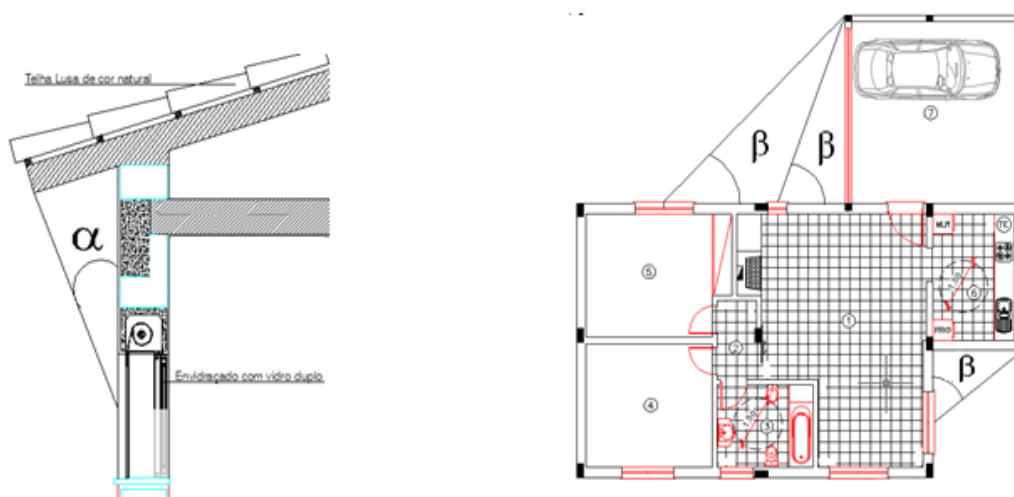
$$g_T = g_{,vi} \prod_i \frac{g_{Tvc}}{0,75} \quad (4.1)$$

$$g_T = 0,75 \times \frac{0,04}{0,75} = 0,04 \quad (4.2)$$

Para a determinação do coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite U_{wdn} , utilizou-se uma janela giratória, vidro duplo incolor e caixilharia metálica com corte térmico, com espaçamento de ar de 16mm. Como dispositivo de proteção utilizam-se as persianas de réguas metálicas com baixa permeabilidade ao ar, correspondendo a um coeficiente de transmissão térmica dia-noite dos envidraçados igual a 2,30 W/m².°C, segundo o Quadro III.2 do ITE50.

4.1.4 Dispositivos de sombreamento e obstruções

Segundo o despacho n.º 15793-k/2013, o cálculo do fator de obstrução solar resulta da multiplicação de três variáveis: F_h , F_o e F_f . O fator de sombreamento do horizonte por obstruções exteriores F_h , que é considerado 20° visto que o edifício em estudo encontra-se localizado fora da zona urbana. O fator de sombreamento por elementos horizontais F_o , representa o beirado afeto a todo o edifício com cerca de 60 cm, a partir do qual se obtiveram os vários ângulos α medidos desde o centro das janelas até ao beirado Figura 4.3 a). Por fim, o fator de sombreamento por elementos verticais F_f , representa a influência da saliência da garagem nos envidraçados da fachada orientada a Nordeste e a influência da saliência da cozinha no envidraçado da fachada orientado a Sudeste, obtendo-se os valores do ângulo β medidos do centro do envidraçado até à extremidade da parede que o afeta Figura 4.3 b).



a) Sombreamento por elementos horizontais

b) Sombreamento por elementos verticais

Figura 4.3- Sombreamentos por elementos horizontais e verticais.

Segundo o despacho n.º 15793-k/2013, para o cálculo do fator de fração envidraçada, F_g , como as caixilharias são metálicas e as janelas não possuem quadrículas, foi utilizado por defeito o valor de 0,7.

4.1.5 Pontes térmicas lineares

Os coeficientes de perdas de transmissão térmica linear Ψ , foram calculados através da tabela do REH, representada no Quadro 3.4. O isolamento encontra-se sobre o pavimento e sobre a cobertura, nas ligações fachada com pavimento e fachada com cobertura, respetivamente. No tipo de ligação de fachada com a caixilharia, o isolamento contacta com a caixilharia. A Figura 4.4 apresenta o pormenor das três situações descritas.

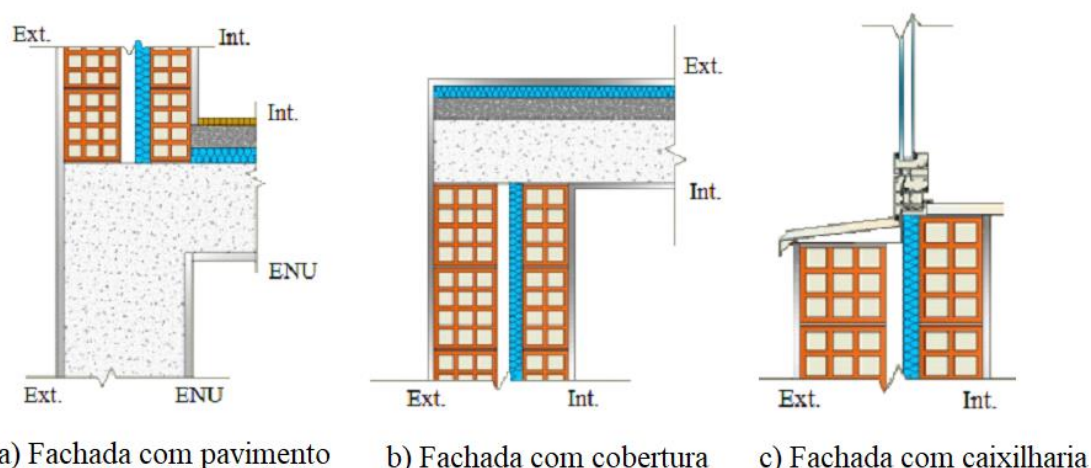


Figura 4.4- Pormenor construtivo de ligações (adaptado ITeCons, 2017).

O Quadro 4.5 indica as ligações entre elementos presentes no edifício, bem como o comprimento de cada ponte térmica linear e o respetivo coeficiente de transmissão térmica linear, retirado do Quadro 3.4. Em todas as ligações descritas, o isolamento encontra-se na caixa de ar.

Quadro 4.5- Pontes térmicas lineares exteriores.

Tipo de ligação entre elementos	Comprimento [m]	Ψ [W/m.°C]
Fachada com pavimento	36,0	0,35
Fachada com cobertura	36,0	1,00
Dois paredes verticais de ângulo saliente	10,5	0,50
Fachada com caixilharia	34,0	0,10
Zona de caixa de estores	10,4	0,30

Para as pontes térmicas lineares interiores, ou seja, em contacto com o espaço não útil, o isolamento nas paredes também foi considerado na caixa de ar ou repartido nesta, e no que toca aos vários tipos de ligação dos elementos, encontra-se sempre sobre o pavimento e a cobertura.

No tipo de ligação de fachada com a caixilharia, o isolamento contacta com a caixilharia. O Quadro 4.6 representa a caracterização das pontes térmicas lineares interiores da habitação.

Quadro 4.6- Pontes térmicas lineares interiores.

Tipo de ligação entre elementos	ENU	Comprimento [m]	Ψ [W/m.°C]
Fachada com pavimento	Garagem	5,2	0,35
Fachada com cobertura	Garagem	5,2	1,00
Fachada com cobertura	Desvão	2,5	1,00
Fachada com caixilharia	Garagem	5,1	0,10

4.1.6 Determinação do coeficiente de redução de perdas

Para a determinação do coeficiente de redução de perdas b_{tr} , para os espaços não úteis, calculou-se o volume destes, dependendo das condições de ventilação do próprio espaço e da relação entre a área do elemento que separa o interior do ENU (espaço não útil), A_i , e a área do elemento que separa o ENU do exterior A_u . O Quadro 4.7 representa as respetivas medições e o valor do b_{tr} da garagem, do desvão de cobertura e do vazio sanitário.

Quadro 4.7- Valores b_{tr} dos espaços não úteis.

ENU	Volume [m ³]	Ventilação	A_i [m ²]	A_u [m ²]	A_i/A_u	b_{tr}
Garagem	59,47	Fracamente ventilado	11,22	34,54	0,32	1,0
Desvão de cobertura	84,06	Fracamente ventilado	76,96	86,58	0,89	0,8
Vazio sanitário	26,19	Fracamente ventilado	87,30	10,80	8,08	0,3

4.1.7 Sistemas técnicos

O edifício não dispõe de uma rede de gás, mas sim a existência de um sistema elétrico, solar e a biomassa. O sistema elétrico é composto por um termoacumulador e o sistema solar é composto por um painel solar térmico, ambos utilizados para o aquecimento de águas sanitárias, enquanto que o sistema a biomassa é composto por um recuperador de calor utilizado para o aquecimento da habitação.

O termoacumulador é de marca e modelo desconhecido com um rendimento mínimo superior a 93% e com a capacidade de 150 litros. Segundo a Portaria n.º 349-B/2013, o termoacumulador apresenta uma dispersão térmica Q_{pr} igual a 2,3 kWh/24h e uma potência de 2 kW.

O sistema solar térmico é do tipo circulação forçada, composto por um coletor solar térmico plano de 2,4 m² do tipo Baxi Roca SOL250, instalado na cobertura inclinada do edifício com a orientação Sudeste e com uma produtividade de referência de 672 kWh/m².ano.

O recuperador de calor é de marca e modelo desconhecido, com uma eficiência de 0,75, que cumpre o requisito mínimo, e que possui uma potência de 6kW.

É de salientar que o isolamento na tubagem de distribuição das AQS possui uma resistência superior a 0,25 m².°C/W, cumprindo com o ponto 3.2 do Despacho n.º 15793-I/2013, e que os sistemas de duche não possuem certificado de eficiência hídrica igual ou superior à classe energética A.

4.2 Construção tradicional

Este é um tipo de construção em betão armado com laje aligeirada de abobadilhas e vigotas pré-esforçadas, com divisórias em alvenaria de tijolo. Todas as vigas têm secção 20×45cm² e são revestidas exteriormente por um reboco pintado à cor clara. Este edifício é constituído por uma cobertura exterior inclinada na zona da cozinha e por uma cobertura interior (laje de esteira) em contacto com o desvão. A descrição destas soluções encontra-se detalhada no Quadro 4.8, bem como o cálculo do coeficiente de transmissão térmica, realizado através da norma EN ISO 6946, como explicado no ponto 3.1.1. Para a determinação dos coeficientes de transmissão térmica máximos, foi consultado o Decreto-Lei n.º 28/2016 de 23 de junho, de forma a verificar o cumprimento de cada U calculado.

Quadro 4.8- Caracterização dos elementos da construção tradicional.

Elemento construtivo	Materiais	Espessura [mm]	Coef. Cond. Térmica (λ) [W/m ² C]	Referência	Espessura Total [cm]	U (REH) [W/(m ² K)]	U máx. [W/(m ² K)]
Parede exterior (PDE1)	Reboco interior pintado	20	1,300	ITE50	37	0,38	0,40
	Tijolo cerâmico	150	0,380	ITE50			
	XPS	60	0,037	ITE50			
	Resistência espaço de ar	10	0,067	ITE50			
	Tijolo cerâmico	110	0,407	ITE50			
	Reboco exterior pintado	20	1,300	ITE50			
Cobertura exterior (CBE1) asc.	Reboco interior	10	1,300	ITE50	35	0,33	0,35
	Lage aligeirada abobadilhas e vigotas pré-esforçadas	200	0,180	ITE50			
	Camada regularização	40	1,300	ITE50			
	XPS	100	0,037	ITE50			
Cobertura exterior (CBE1) desc.	Reboco interior	10	1,300	ITE50	35	0,32	0,35
	Lage aligeirada abobadilhas e vigotas pré-esforçadas	200	0,190	ITE50			
	Camada regularização	40	1,300	ITE50			
	XPS	100	0,037	ITE50			
Porta exterior (V0E1)	Alumínio	5	230,000	ITE50	4	1,13	Não definido
	Poliuretano	30	0,042	ITE50			
	Alumínio	5	230,000	ITE50			
Parede interior separação com a garagem (PDI1)	Reboco interior	20	1,300	ITE50	37	0,37	0,40
	Tijolo cerâmico	150	0,380	ITE50			
	XPS	60	0,037	ITE50			
	Resistência espaço de ar	10	0,067	ITE50			
	Tijolo cerâmico	110	0,407	ITE50			
	Reboco exterior	20	1,300	ITE50			
Parede interior separação com o sótão (PDI2)	Reboco interior	20	1,300	ITE50	24	0,39	0,40
	Tijolo cerâmico	150	0,380	ITE50			
	XPS	70	0,037	ITE50			
Porta interior (V0I1)	Alumínio	5	230,000	ITE50	4	1,03	Não definido
	Poliuretano	30	0,042	ITE50			
	Alumínio	5	230,000	ITE50			
Pavimento interior (PVI1) desc.	Revestimento interior flutuante	7	0,230	ITE50	35	0,32	0,70
	Camada regularização	40	1,300	ITE50			
	XPS	40	0,037	ITE50			
	Enchimento betão leve	60	0,040	Amorim Isolamentos			
	Lage aligeirada abobadilhas e vigotas pré-esforçadas	200	0,190	ITE50			
Laje de divisória com o sótão (CBI1) asc.	Reboco interior	10	1,300	ITE50	31	0,32	0,35
	Lage aligeirada abobadilhas e vigotas pré-esforçadas	200	0,190	ITE50			
	XPS	100	0,037	ITE50			
Laje de divisória com o sótão (CBI1) desc.	Reboco interior	10	1,300	ITE50	31	0,31	0,35
	Lage aligeirada abobadilhas e vigotas pré-esforçadas	200	0,190	ITE50			
	XPS	100	0,037	ITE50			

4.2.1 Ponte térmica plana

A ponte térmica plana em talão de vigas e pilares, para a construção tradicional, é constituída por: revestimento exterior em reboco pintado à cor clara com 2cm de espessura, viga em betão armado com 20cm de espessura, isolamento térmico XPS com 4cm, forra em tijolo com 30×20×9, e um reboco interior com 2cm. A equação (4.3) representa a substituição destes valores segundo a equação (3.1), apresentada no ponto 3.1.1.

$$U = \frac{1}{0,13 + \frac{0,02}{1,3} + \frac{0,2}{2} + \frac{0,04}{0,037} + 0,23 + \frac{0,02}{1,3} + 0,04} = 0,62 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (4.3)$$

Cumpra-se assim o regulamento visto que 0,62 W/(m²K) é inferior a 0,9 W/(m²K), (valor máximo admissível).

Relativamente à caixa de estore, foi considerada uma caixa EPS 100, da empresa Plastimar (Plastimar, 2011). A mesma é constituída por uma camada de reboco superficial aplicada sobre a armadura de fibra de vidro com 2cm e um isolamento EPS de 3cm. O espaço interior da caixa de estore foi considerado não aquecido e, por isso, apenas se deliberou o cálculo do U com a resistência térmica superficial interior em ambos os lados. A Figura 4.5 representa o pormenor desta caixa de estore e a equação (4.4) o respetivo cálculo do coeficiente de transmissão térmica.

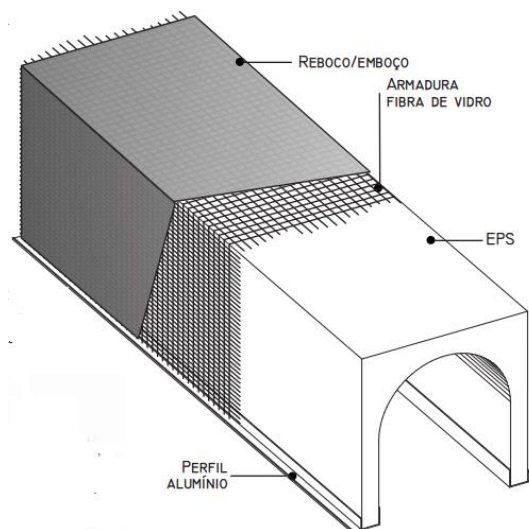


Figura 4.5- Pormenor da caixa de estore (Plastimar, 2011).

$$U = \frac{1}{0,13 + \frac{0,03}{0,036} + \frac{0,02}{1,3} + 0,13} = 0,90 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (4.4)$$

4.2.2 Classe de inércia térmica

A inércia térmica do edifício foi determinada a partir da massa superficial útil de cada elemento M_{si} , da área da superfície interior S_i e da área útil do pavimento A_p , como expresso na equação (3.5). O Quadro 4.9 representa a massa volúmica de cada elemento após o isolamento térmico, ou seja, desde o isolamento até à parte interior de cada elemento, e a referência consultada.

Quadro 4.9- Massas volúmicas dos materiais de construção tradicional.

Materiais	Massa volúmica [kg/m³]	Referência
Camada de regularização	2000	ITE50
Lage aligeirada de abobadilhas e vigotas pré-esforçadas	2000	ITE50
Tijolo 9	1000	ITE50
Tijolo 15	1000	ITE50
Reboco interior	2000	ITE50
Revest. interior de piso	886	SOFERRAGENS

Após a inserção das áreas e da massa superficial útil de cada elemento na folha de cálculo do ITeCons, o valor da inércia térmica é de 545,46 kg/m². Segundo o regulamento, REH, verifica-se que a inércia térmica pertence a uma classe de inércia térmica forte, pois o valor encontrado é superior a 400 kg/m².

4.3 Construção em LSF

A caracterização das paredes, cobertura e lajes é descrita no Quadro 4.10, bem como o cálculo do coeficiente de transmissão térmica, realizado através da norma EN ISO 6946, como explicado no ponto 3.1.1. Os valores máximos dos coeficientes de transmissão térmica foram consultados através do Decreto-Lei n.º 28/2016. Para o cálculo do parâmetro U desprezaram-se os perfis metálicos. No capítulo 5, para comparação, será analisado o cálculo de U a partir de diferentes métodos que permitirão a consideração dos perfis metálicos no mesmo. Os perfis mais utilizados para construções em LSF, segundo Futureng (2017), como explicado no ponto 2.2.1, apresentam normalmente uma secção transversal U , C , ou Z , sendo os mais utilizados, os perfis $C90$ ou $U93$ para paredes interiores, $C150$ ou $U153$ para paredes exteriores, $C200$ ou $U204$ para lajes de menor dimensão, varandas, coberturas médias, e $C250$ ou $U255$ para lajes de maior dimensão e vigas de cobertura. Para o edifício em estudo, como forma de tentar uniformizar ao máximo a escolha dos perfis, decidiu-se utilizar $C150$ para paredes exteriores e interiores, e $C200$ para a laje de esteira e a cobertura, ambos com uma espessura de 1,5 e 2mm, respetivamente. Os perfis encontram-se espaçados de 60 em 60cm. A Figura 4.6 representa o pormenor de uma parede em LSF, com a vista exterior e interior.

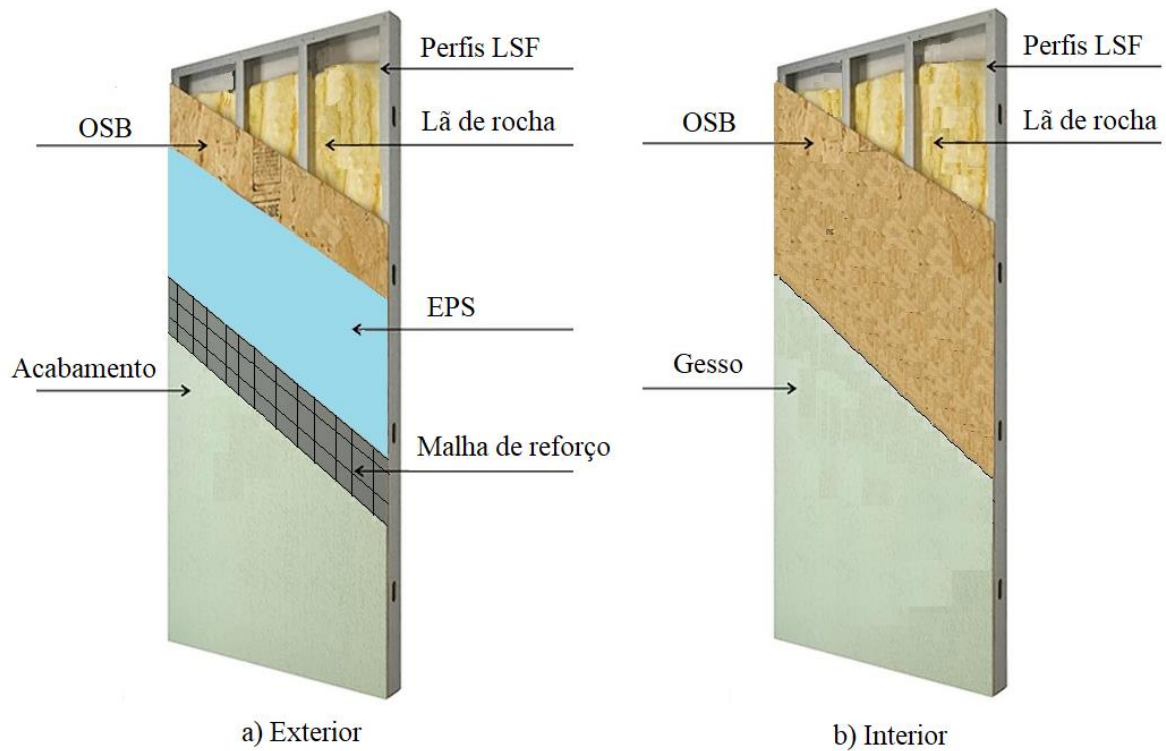


Figura 4.6- Vistas exterior e interior de uma parede em LSF.

De forma a compreender melhor a caracterização da cobertura exterior, a Figura 4.7 representa um pormenor dos vários constituintes da cobertura.

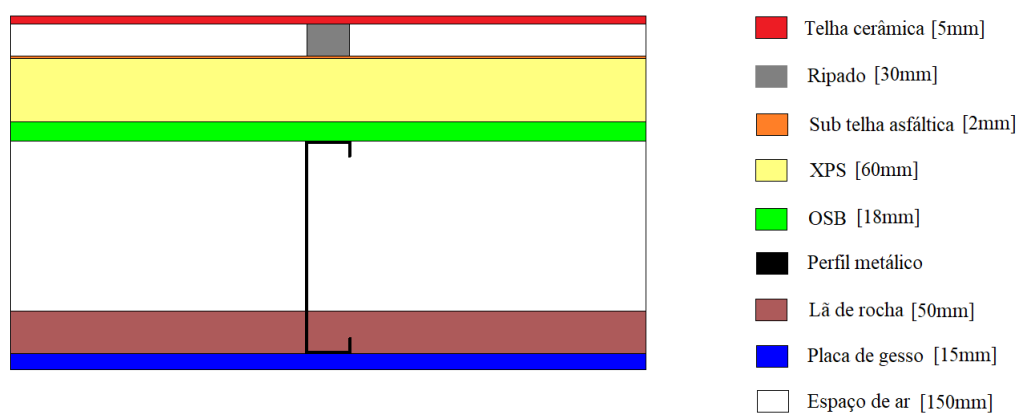


Figura 4.7- Representação do pormenor construtivo da cobertura exterior.

Quadro 4.10- Caracterização da construção em LSF.

Elemento construtivo	Materiais	Espessura [mm]	Coef. Cond. Térmica (λ) [W/m ² C]	Referência	Espessura Total [cm]	U (REH) [W/(m ² K)]	U máx. [W/(m ² K)]
Parede exterior (PDE1)	Gesso	15	0,250	ITE50	26	0,38	0,40
	OSB	18	0,130	ITE50			
	Lã de rocha	20	0,042	ITE50			
	Resistência espaço de ar	130	0,722	REH			
	OSB	18	0,130	ITE50			
	EPS	60	0,040	ITE50			
	Acabamento ETICS	3	0,720	Santos P. 2012			
Cobertura exterior (CBE1) asc.	Gesso	15	0,250	ITE50	33	0,33	0,35
	Lã de rocha	50	0,042	ITE50			
	Resistência espaço de ar asc.	160	1,000	REH			
	OSB	18	0,130	ITE50			
	XPS	60	0,037	ITE50			
	Sub telha asfáltica	2	0,350	ITE 50			
	Ripado	30	1,300	ITE50			
Cobertura exterior (CBE1) desc.	Gesso	15	0,250	ITE50	33	0,31	0,35
	Lã de rocha	50	0,042	ITE50			
	Resistência espaço de ar desc.	160	0,723	REH			
	OSB	18	0,130	ITE50			
	XPS	60	0,037	ITE50			
	Sub telha asfáltica	2	0,350	ITE 50			
	Ripado	30	1,300	ITE50			
Parede interior separação com a garagem (PDI1)	Gesso	15	0,250	ITE50	26	0,36	0,40
	OSB	18	0,130	ITE50			
	Lã de rocha	20	0,042	ITE50			
	Resistência espaço de ar	130	0,722	REH			
	OSB	18	0,130	ITE50			
	EPS	60	0,040	ITE50			
	Acabamento ETICS	3	0,720	Santos P. 2012			
Parede interior separação com o sótão (PDI2)	Gesso	15	0,250	ITE50	22	0,37	0,40
	OSB	18	0,130	ITE50			
	Lã de rocha	80	0,042	ITE50			
	Resistência espaço de ar	70	0,389	REH			
	OSB	18	0,130	ITE50			
	Gesso	15	0,250	ITE50			
Laje de divisória com o sótão (CBI1) asc.	Gesso	15	0,250	ITE50	23	0,32	0,35
	Lã de rocha	110	0,042	ITE50			
	Resistência espaço de ar asc.	90	0,625	REH			
	OSB	18	0,130	ITE50			
Laje de divisória com o sótão (CBI1) desc.	Gesso	15	0,250	ITE50	23	0,30	0,35
	Lã de rocha	110	0,042	ITE50			
	Resistência espaço de ar desc.	90	0,455	REH			
	OSB	18	0,130	ITE50			

Relativamente ao pavimento, este não sofrerá nenhuma alteração e será igual ao descrito no Quadro 4.8, de forma a evitar o contacto com o solo, que levaria ao ganho de humidades e posteriormente oxidação do aço. Não houve assim nenhuma alteração nas fundações, nem no pavimento desta habitação, a construção LSF propriamente dita apenas será do pavimento térreo para cima, tal como é usual.

4.3.1 Ponte térmica plana

A construção em LSF não possui pontes térmicas planas, visto que não existem heterogeneidades estruturais como na construção tradicional, em que os pilares e as vigas têm que ser contabilizadas à parte devido a maiores perdas do que nas zonas correntes em alvenaria (Futureng, 2017). Contudo, não se pode desprezar a ponte térmica plana existente na caixa de estore, que é calculada da mesma forma que na construção tradicional (eq. 4.4).

4.3.2 Classe de inércia térmica

A classe de inércia térmica foi calculada conforme o descrito no ponto 4.2.1. O Quadro 4.11 representa a massa volúmica de cada elemento após o isolamento térmico, e a referência consultada.

Quadro 4.11- Massas volúmicas dos materiais de construção em LSF.

Materiais	Massa volúmica [kg/m³]	Referência
Gesso	607	Gyptec
OSB	640	Steel Portugal
Reboco interior	2000	ITE50

Após a inserção das áreas e da massa superficial útil de cada elemento na folha de cálculo do (ITeCons, 2017), o valor da inércia térmica é de 138,63 kg/m². O regulamento indica que pertence a uma classe de inércia térmica fraca, visto que este valor é inferior a 150 kg/m².

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo, com o objetivo de comparar o coeficiente de transmissão térmica na construção LSF, serão apresentados três métodos de cálculo de U . Em primeiro lugar, será comparado o U , sem considerar a presença dos perfis de aço, calculado através da norma ISO 6946 e da ferramenta THERM. Esta comparação irá permitir verificar o modelo de THERM desenvolvido. Em segundo lugar, serão considerados os perfis de aço ao cálculo no THERM e depois será ajustada a espessura de lã de rocha de modo a que os valores de U se aproximem dos obtidos para a construção tradicional. Em terceiro lugar, serão comparados estes valores de U ajustados à construção tradicional ao método desenvolvido por Gorgolewski (2007). Posteriormente, será realizada uma análise energética dos dois tipos de construção, utilizando o U com os perfis de aço “adicionados” no THERM, forçados a terem exatamente o mesmo valor, de forma a comparar as necessidades energéticas, ganhos térmicos, perdas térmicas e classificação energética do edifício.

5.1 Comparação dos valores de U

A resistência térmica da estrutura leve em aço, foi calculada através da EN ISO 6946, como tal, não se teve em conta os perfis de aço. Para considerar a existência dos perfis em aço, como explicado no ponto 3.1.1, foi utilizada a ferramenta de cálculo THERM. Ao modelar cada elemento construtivo no programa, foi calculado novamente o U , não incluindo os perfis (THERM sem aço), de forma verificar os resultados obtidos. Comprovada a fiabilidade do modelo THERM, adicionaram-se os perfis de aço (THERM com aço). O Quadro 5.1 apresenta o resumo dos resultados obtidos do cálculo de U através da EN ISO 6946 e do *software* THERM, com e sem os perfis metálicos. Os elementos construtivos deste quadro encontram-se descritos no capítulo 4.

Quadro 5.1- Comparação do cálculo de U através da norma ISO 6946 e do THERM.

LSF	U [W/(m ² K)]		
	EN ISO 6946	THERM (sem aço)	THERM (com aço)
Parede exterior (PDE1)	0,38	0,38	0,40
Cobertura exterior (CBE1) asc.	0,33	0,33	0,38
Cobertura exterior (CBE1) desc.	0,31	0,31	0,36
Parede divisória com a garagem (PDI1)	0,36	0,36	0,38
Parede interior separação com o sótão (PDI2)	0,37	0,37	0,52
Laje de esteira (CBI1) asc.	0,32	0,32	0,60
Laje de esteira (CBI1) desc.	0,30	0,30	0,52

Assim, como esperado os valores calculados através da EN ISO 6946 são exatamente os mesmos do que os do THERM (sem aço). Após a “adição” dos perfis de aço na ferramenta THERM, o coeficiente de transmissão térmica aumentou em todos os elementos, devido à elevada condutibilidade térmica do aço. Realizaram-se várias tentativas na ferramenta THERM, utilizando os valores de U (THERM com aço), representados no Quadro 5.1, de forma a obter um valor de coeficiente de transmissão térmica o mais próximo possível do valor calculado para a construção tradicional (THERM ajustado), alterando apenas a espessura de lã de rocha. O Quadro 5.2 representa o valor de U calculado anteriormente (THERM com aço), e o valor de U final já com a espessura de lã de rocha alterada (THERM ajustado).

Quadro 5.2- Aproximação de U à construção tradicional com variação da espessura de lã de rocha.

LSF	U [W/(m ² K)]		Espessura lã de rocha [mm]	
	THERM (com aço)	THERM (ajustado)	THERM (com aço)	THERM (ajustado)
(PDE1)	0,40	0,37	20	30
(CBE1) asc.	0,38	0,32	50	90
(CBE1) desc.	0,36	0,31	50	90
(PDI1)	0,38	0,36	20	30
(PDI2)	0,52	0,38	80	150
(CBI1) asc.	0,60	0,32	110	220
(CBI1) desc.	0,52	0,30	110	220

Como se pode observar no Quadro 5.2, as paredes exteriores (PDE1) e a parede interior de separação com a garagem (PDI2), possuem o mesmo sistema construtivo, estando bem isoladas termicamente, EPS e sistema ETICS, o valor de lã de rocha apenas teve uma variação de 10mm de espessura. O mesmo acontece à cobertura exterior (CBE1), com uma variação de 40mm de lã de rocha. Quanto à parede interior de separação com o sótão (PDI2) e à laje de esteira (CBI1), a variação de lã de rocha é superior, pois ambas apenas a possuem como isolamento térmico, não dispondo de EPS ou XPS. É de salientar que a (CBI1) ficou com uma espessura de 220mm, pois 200mm corresponde ao perfil totalmente preenchido e os restantes 20mm colocados na parte superior da laje. No ANEXO A, estão representadas imagens de cada um destes elementos construtivos obtidas através da ferramenta THERM.

Outro método utilizado para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica, foi o método desenvolvido por Gorgolewski (2007), explicado no ponto 3.1.1. No ANEXO B, encontra-se representado o cálculo efetuado para obtenção do U segundo este método. O Quadro 5.3 representa a comparação entre o U calculado através da norma ISO 6946, já com as espessuras

ajustadas, através do *software* THERM já ajustado à construção tradicional (THERM ajustado) e o U resultante da aplicação do método desenvolvido por Gorgolewski.

Quadro 5.3- Comparação entre os três métodos de cálculo de U .

LSF	U [W/(m ² K)]		
	EN ISO 6946 (ajustado)	THERM (ajustado)	Gorgolewski
(PDE1)	0,34	0,37	0,36
(CBE1) asc.	0,23	0,32	0,28
(CBE1) desc.	0,23	0,31	0,27
(PDI1)	0,33	0,36	0,34
(PDI2)	0,24	0,38	0,40
(CBI1) asc.	0,18	0,32	0,34
(CBI1) desc.	0,17	0,30	0,32

Segundo o Quadro 5.3, percebe-se que, ao utilizar a norma ISO 6946 para o cálculo de U do sistema construtivo leve em aço, já com os valores de lâ de rocha ajustados, U será inferior relativamente ao cálculo segundo o THERM (ajustado). É inferior devido à não influência de pontes térmicas, ou seja, os perfis metálicos. Relativamente ao método desenvolvido por Gorgolewski (2007), com as mesmas espessuras de lâ de rocha utilizadas no THERM (ajustado), os valores não são muito diferentes, resultou um máximo de 4 W/(m²K), ocorrente na zona da cobertura exterior.

5.2 Análise energética

Após a determinação dos coeficientes de transmissão térmica, foram transpostos os dados para a folha de Excel disponibilizada pelo ITeCons, para avaliação do comportamento térmico e do desempenho energético de edifícios, segundo o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH, 2016). Esta folha foi utilizada com o objetivo de determinar os parâmetros N_{ic} , N_{vc} , N_{tc} e a classificação energética dos diferentes tipos de construção. Foram preenchidas duas folhas, uma para a construção tradicional e outra para a construção em LSF. Ambos os tipos de construção resultaram numa classe energética A+. Os Quadros 5.4 e o Quadro 5.5 resumem os valores obtidos para N_{ic} , N_i , N_{vc} , N_v , N_{tc} e N_t , referentes ao edifício de construção tradicional e em LSF, respetivamente.

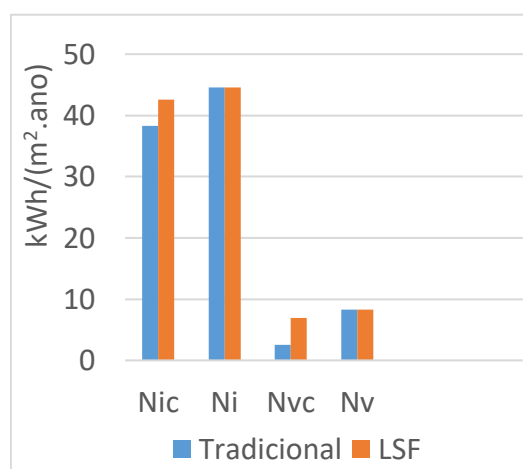
Quadro 5.4- Parâmetros energéticos referentes à construção tradicional.

N_{ic}	N_i	N_{vc}	N_v	N_{tc}	N_t	N_{tc}/N_t
[kWh/(m ² .ano)]				[kWh _{ep} /(m ² .ano)]		
38,25	44,57	2,52	8,31	8,97	113,32	0,08

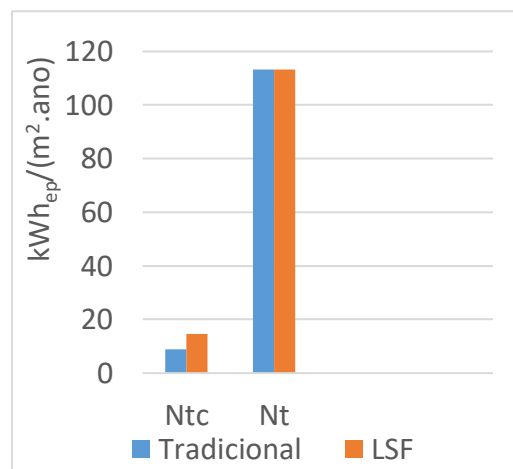
Quadro 5.5- Parâmetros energéticos referentes à construção em LSF.

Nic	Ni	Nvc	Nv	Ntc	Nt	Ntc/Nt
[kWh/(m ² .ano)]				[kWh _{ep} /(m ² .ano)]		
42,61	44,57	6,88	8,31	14,70	113,32	0,13

Através de ambos os quadros, verifica-se que todos os parâmetros satisfazem os requisitos mínimos do regulamento, visto que N_{ic} , N_{vc} e N_{ic} , não ultrapassam os valores de referência. Em termos percentuais, as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento N_{ic} na estrutura leve em aço são cerca de 11% superiores às necessidades da construção tradicional. Relativamente às necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento N_{vc} , a estrutura LSF apresenta um consumo energético superior, visto que necessita cerca de 73% mais de energia do que a construção tradicional. Como a necessidade de energia útil para aquecimento e arrefecimento é superior na construção em LSF e a energia útil para a preparação de água quente sanitária, Q_a , é igual para os dois tipos de construção, isto leva a que as necessidades nominais anuais globais de energia primária, N_{tc} , sejam cerca de 64% superiores na construção em LSF. A Figura 5.1 representa os gráficos de comparação entre as necessidades globais anuais de energia útil e de energia primária.



a) Necessidades globais anuais de energia útil.



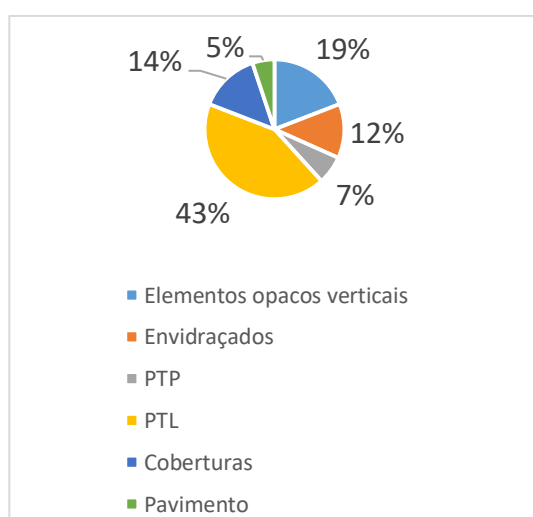
b) Necessidades globais anuais de energia primária.

Figura 5.1- Comparação das necessidades globais anuais de energia útil em [kWh/(m².ano)] e comparação das necessidades globais anuais de energia primária em [kWh_{ep}/m².ano].

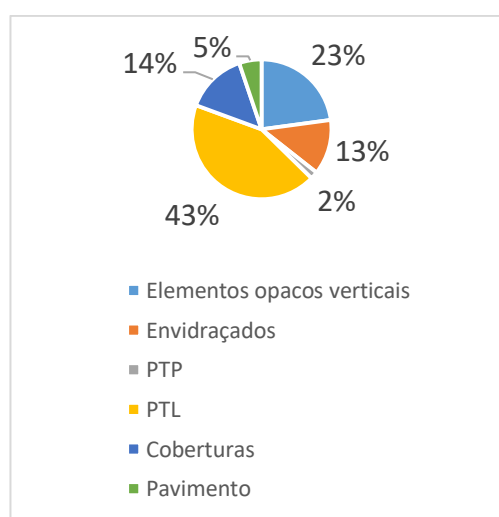
A metodologia referente às perdas e ganhos térmicos, nas estações de aquecimento e arrefecimento, encontra-se expressa no ponto 3.2.1. Com a folha de Excel do ITeCons, foi possível obter os resultados dos dois tipos de construção. Para a estação de aquecimento, determinaram-se as perdas térmicas (aos elementos opacos verticais, aos envidraçados, às pontes térmicas planas e lineares, ao pavimento e às coberturas) e ganhos térmicos através dos envidraçados e fontes internas. Para a estação de arrefecimento, determinaram-se também as perdas térmicas e os ganhos térmicos através da envolvente opaca vertical (paredes), envidraçados, pontes térmicas planas, coberturas e fontes internas de calor. O Quadro 5.6 representa a comparação das perdas térmicas no edifício de construção tradicional e no edifício de construção em LSF, durante a estação de aquecimento, e a Figura 5.2 a correspondente percentagem destas perdas térmicas relativas a cada método.

Quadro 5.6- Comparação das perdas térmicas entre a construção tradicional e em LSF, na estação de aquecimento.

Perdas	Tradicional [kWh/ano]	LSF [kWh/ano]
Elementos opacos verticais	1004,34	1182,67
Envidraçados	659,85	659,85
PTP	345,13	89,96
PTL	2238,24	2238,24
Coberturas	735,41	735,41
Pavimento	268,29	268,29
Q_{tri}	5251,26	5174,42



a) Tradicional



b) LSF

Figura 5.2- Perdas térmicas na construção tradicional e em LSF na estação de aquecimento.

Como se pode observar na Figura 5.2, as pontes térmicas lineares apresentam uma maior percentagem de perdas térmicas quer para o tipo de construção tradicional, quer para o tipo de construção em LSF, sendo este valor influenciado pelo valor do coeficiente de transmissão térmica linear Ψ utilizado (Quadro 3.4) e pela posição do isolamento escolhida. Apesar da construção em LSF ser revestida exteriormente por um sistema ETICS e por placas OSB, que contêm baixa condutibilidade térmica, os perfis que estão espaçados a cada 60cm e que interrompem o isolamento térmico, têm uma influência bastante significativa no que diz respeito às perdas térmicas. Comparando as perdas térmicas na construção tradicional e a construção em LSF através do Quadro 5.6, percebe-se que apenas existem diferentes percentagens de transferência de calor nas pontes térmicas planas (PTP) e nas paredes (elementos opacos verticais). Torna-se compreensível a diferença de pontes térmicas na construção em LSF, visto que apenas foram contabilizadas as PTP nas caixas de estore, enquanto que na construção tradicional foram contabilizadas as PTP nas caixas de estore, nas vigas e nos pilares. Relativamente às paredes, como na parte opaca da parede em LSF apenas existe a ponte térmica plana das caixas de estore (pois não existe vigas nem pilares em betão armado), a área da parede seria superior à da construção tradicional, enquanto que na construção tradicional a área de cada parede teria o desconto das áreas das PTP. Globalmente a construção tradicional apresenta maiores perdas térmicas do que a construção em LSF, pois a transferência de calor por transmissão também é maior.

A transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento $H_{ve,i}$ foi calculada através da equação (3.11), correspondendo a um valor de 35,31W/°C para ambos os tipos de construção, as perdas térmicas de calor por ventilação $Q_{ve,i}$ calculadas através da equação (3.10) correspondem a um valor de 1130,24kWh/ano para a construção tradicional e em LSF.

Relativamente aos ganhos térmicos na estação de aquecimento, apenas são contabilizados os ganhos associados a fontes internas de calor $Q_{int,i}$ e os ganhos brutos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos vãos envidraçados $Q_{sol,i}$. O Quadro 5.7 apresenta os ganhos térmicos destas duas origens no período de aquecimento.

Quadro 5.7- Ganhos térmicos na estação de aquecimento.

Ganhos	Tradicional [kWh/ano]	LSF [kWh/ano]
Envidraçados	1857,28	1857,28
Fontes internas	1510,14	1510,14

Ambos os sistemas construtivos possuem os mesmos ganhos térmicos durante o Inverno, pois o tipo de envidraçados e as fontes de calor são as mesmas em ambas as construções.

A perdas térmicas relativas ao período de arrefecimento para os dois métodos de construção estão descritas no Quadro 5.8.

Quadro 5.8- Comparação das perdas térmicas entre a construção tradicional e em LSF, na estação de arrefecimento.

Perdas	Tradicional [kWh/ano]	LSF [kWh/ano]
Elementos opacos verticais	367,41	432,64
Envidraçados	241,38	241,38
PTP	126,26	32,91
PTL	818,79	818,79
Coberturas	269,02	269,02
Pavimento	98,15	98,15
$Q_{tr,v}$	1921,01	1893,07

Analisando o Quadro 5.8, acontece a mesma situação que nas perdas térmicas durante a estação de aquecimento. Apenas as paredes e as PTP têm diferentes valores de perdas, pois como o valor de U é exatamente o mesmo para os dois métodos construtivos, apenas variará a área das paredes e as PTP existentes. Tal como na estação de aquecimento, também no arrefecimento a construção tradicional apresenta uma maior quantidade de perdas térmicas relativamente à construção em LSF. Os ganhos térmicos para os dois tipos de construção durante o período de arrefecimento, estão representados no Quadro 5.9 e na Figura 5.3.

Quadro 5.9- Comparação dos ganhos térmicos na construção tradicional e em LSF, na estação de arrefecimento.

Ganhos	Tradicional [kWh/ano]	LSF [kWh/ano]
Envolvente opaca vertical	256,24	237,22
Envidraçados	544,71	544,71
Coberturas	305,96	305,96
Fontes internas	975,73	975,73
Ganhos brutos $Q_{g,v}$	2082,64	2063,62

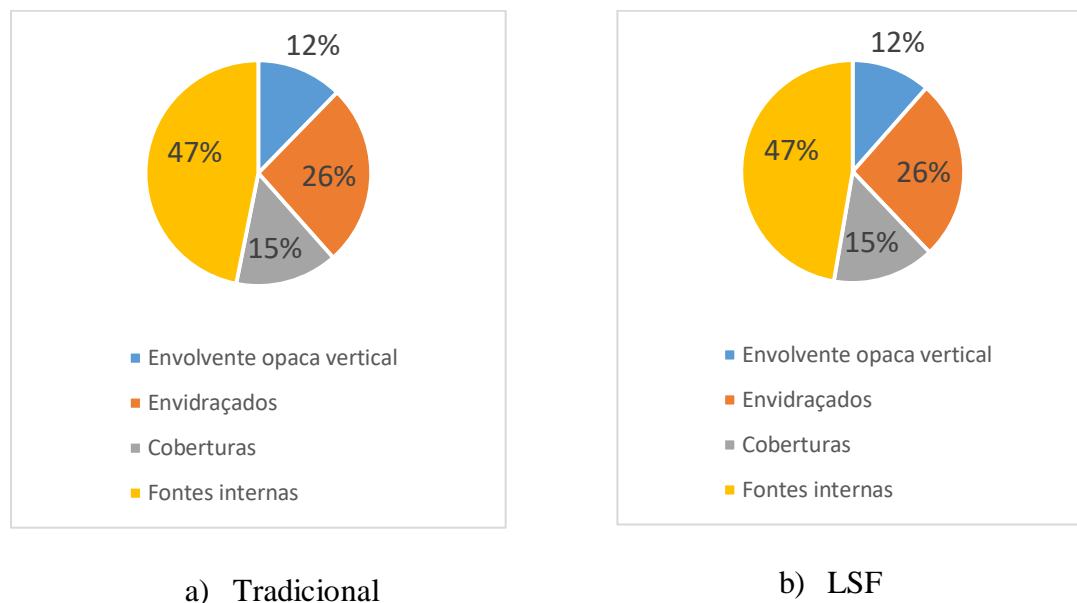


Figura 5.3- Ganhos térmicos na construção tradicional e em LSF na estação de arrefecimento.

Analisando os gráficos da Figura 5.3, onde as percentagens de cada método construtivo são calculadas separadamente em relação ao valor total dos ganhos brutos, conclui-se que as fontes internas originam maiores ganhos térmicos, com uma percentagem de 47%. Relativamente aos restantes locais, verifica-se que serão os envidraçados a proporcionar os maiores ganhos térmicos no edifício, seguidamente as coberturas e por fim as paredes. Em termos de ganhos brutos, a construção tradicional apresenta maiores ganhos devido à envolvente opaca vertical. O Quadro 5.10 resume a comparação dos ganhos térmicos totais na estação de aquecimento.

Quadro 5.10- Resumo da comparação de ganhos na estação de aquecimento [kWh/ano].

Estação de aquecimento	Tradicional	LSF
Ganhos solares brutos $Q_{sol,i}$	1857,28	1857,28
Ganhos internos brutos $Q_{int,i}$	1510,14	1510,14
Ganhos totais brutos $Q_{g,i}$	3367,42	3367,42
Ganhos totais úteis $Q_{gu,i}$	3266,40	2761,28
γ	0,52	0,53
η	0,97	0,82

Este Quadro 5.10 possui a descrição dos ganhos térmicos brutos e dos parâmetros para a determinação dos ganhos térmicos úteis $Q_{gu,i}$, nomeadamente o parâmetro γ , que representa a relação entre os ganhos e as perdas, e o fator de utilização de ganhos η , que depende de γ e posteriormente de um parâmetro, a , dependente da inércia térmica do edifício. Para a estação de aquecimento, os ganhos térmicos totais brutos são iguais para ambos os tipos de construção, pois, como se pode observar no Quadro 5.7, tanto os ganhos solares brutos como os ganhos

internos brutos possuem o mesmo valor em ambas as construções. Torna-se favorável que o valor de ganhos internos brutos seja elevado, pois pode levar à minimização de gastos económicos através de sistemas de aquecimento, como por exemplo, o ar condicionado. Os ganhos totais úteis são superiores na construção tradicional, pois como estes resultam da multiplicação entre os ganhos totais brutos $Q_{g,i}$ e o fator de utilização de ganhos η , em que este fator depende de um parâmetro a (que é função da classe de inércia térmica), observa-se que a construção tradicional possui assim maiores ganhos desejáveis no interior da habitação. Seguidamente, de forma a fazer a mesma análise para a estação de arrefecimento, seguem-se o Quadro 5.11 e a Figura 5.4 que representam a comparação dos ganhos térmicos totais.

Quadro 5.11- Resumo da comparação de ganhos na estação de arrefecimento [kWh/ano].

Estação de arrefecimento	Tradicional	LSF
Ganhos solares pela envolvente opaca exterior	562,20	543,18
Ganhos solares pelos vãos envidraçados exteriores	544,71	544,71
Ganhos solares brutos $Q_{sol,v}$	1106,91	1087,89
Ganhos internos brutos $Q_{int,v}$	975,73	975,73
Ganhos totais brutos $Q_{g,v}$	2082,64	2063,62
γ	0,77	0,77
η	0,90	0,72

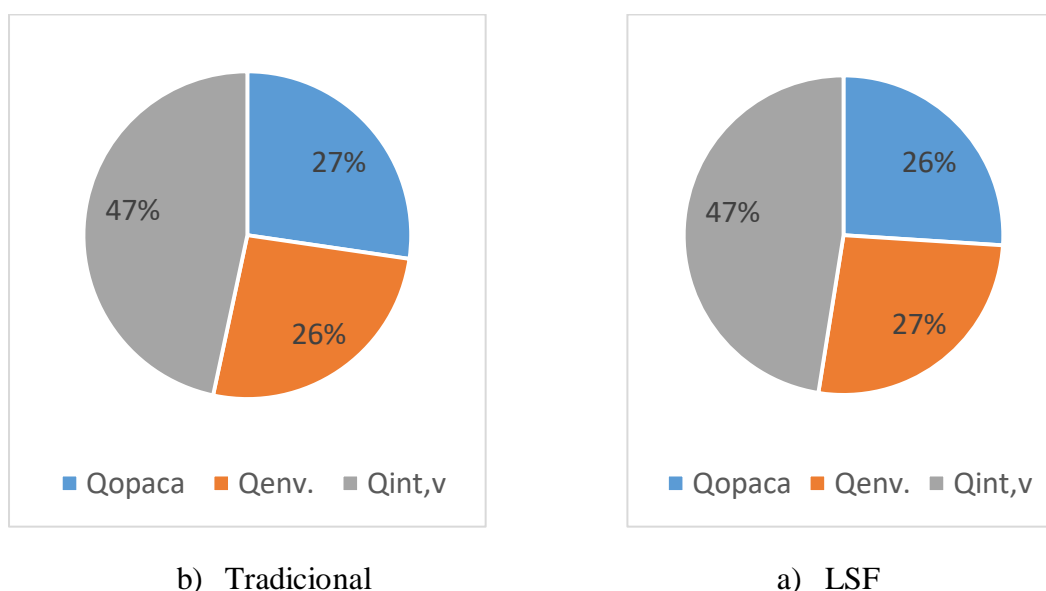


Figura 5.4- Comparação dos ganhos solares e ganhos internos brutos na estação de arrefecimento.

Para a determinação dos ganhos térmicos solares na estação de arrefecimento, não são apenas considerados os ganhos solares através dos vãos envidraçados, como na estação de aquecimento, mas também os ganhos solares provenientes da envolvente opaca exterior, como paredes e coberturas. Analisando o Quadro 5.11, observa-se que os ganhos solares brutos através dos vãos envidraçados são exatamente os mesmos para os dois tipos de construção, variando apenas os ganhos solares através da envolvente opaca exterior.

Em termos de envolvente opaca para a estação de arrefecimento, anualmente, é melhor a constituição de uma parede em LSF do que em alvenaria, pois os ganhos totais brutos da construção em LSF são inferiores. Os gráficos da Figura 5.4 retratam que a maior percentagem de ganhos na estação de arrefecimento, ocorre através de ganhos internos brutos, com 47%, o que pode levar a condições de desconforto térmico. Estes ganhos podem dever-se aos moradores do edifício, a equipamentos como televisões, fogões, computadores, iluminação elétrica, não sendo considerados aqui equipamentos que tenham a função de climatizar o ambiente, como por exemplo, o ar condicionado.

Comparando os resultados da construção tradicional com a construção em LSF, verifica-se uma maior necessidade nominal anual de energia útil para aquecimento, N_{ic} , na construção em LSF, devido a esta possuir menores ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento e menor transferência de calor por transmissão. Estes ganhos são inferiores pois o fator de utilização dos ganhos térmicos depende da inércia térmica, que é menor na construção em LSF. Relativamente às necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento, N_{vc} , também são superiores na construção leve em aço devido ao fator de ganhos térmicos ser inferior.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação centrou-se na avaliação e comparação do desempenho térmico e energético de um edifício de habitação unifamiliar, segundo dois sistemas de construção, tradicional e em LSF. Realizou-se um ajuste no coeficiente de transmissão térmica da construção em LSF, alterando apenas a espessura de lã de rocha, de forma a que ambos os tipos de construção possuíssem um valor de U semelhante. Após este ajuste, foram utilizados três métodos de cálculo do coeficiente de transmissão térmica para a estrutura leve em aço, a Norma ISO 6946 que se adequa principalmente ao cálculo do U em construções de alvenaria ou de madeira, não tendo em conta o perfil metálico na construção em LSF. A ferramenta de cálculo THERM, baseada no método dos elementos finitos, capaz de calcular o U incluindo o perfil metálico em cada elemento. Por fim, o método simplificado desenvolvido por Gorgolewski (2007) para determinação de U , em elementos construtivos em LSF, incluindo a influência dos perfis metálicos.

Após esta análise do coeficiente de transmissão térmica, U , foi utilizada a metodologia regulamentar nacional (REH) para determinar as necessidades energéticas de cada método construtivo, os ganhos e perdas térmicas, e a sua classificação energética.

Quando “adicionados” os perfis de aço a cada elemento construtivo, para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica, o valor de U aumenta devido à elevada condutibilidade térmica do aço. Para que o valor de U volte a ser o mesmo sem considerar os perfis de aço, optou-se por aumentar a espessura da lã de rocha. Esta alteração implica um aumento de 10mm na espessura da lã de rocha nas paredes exteriores, de 40mm na cobertura exterior, de 110mm na laje de esteira e de 70mm nas paredes interiores. A laje de esteira e as paredes exteriores necessitam de um maior aumento de espessura de lã de rocha devido à sua espessura total ser inferior aos outros elementos construtivos e ao facto de não possuírem outro isolamento térmico que não seja a lã de rocha.

A correta utilização do *software* THERM foi verificada por comparação dos modelos dos elementos construtivos em LSF, sem considerar os perfis em aço com os resultados do método de cálculo analítico previsto pela norma ISO 6946. Esta norma não é adequada para calcular o valor de U na construção em LSF, dado que não considera de forma rigorosa o efeito dos perfis em aço. Ao comparar o THERM com o método de Gorgolewski (2007), os valores são bastante aproximados. Destes dois métodos, o THERM é o mais rigoroso para a construção em LSF, dado que permite modelar com rigor os perfis em aço utilizando um algoritmo bidimensional de elementos finitos.

Em termos de desempenho energético, ambos os tipos de construção apresentaram uma classificação energética *A+*. O estudo comparativo da Futureng (2017) apenas alterou a envolvente exterior, ou seja, valores de U distintos, mantendo a arquitetura e os equipamentos, chegando à conclusão que a construção em LSF apresentava menores necessidades energéticas do que a construção tradicional. Nesta dissertação, optou-se por comparar as duas soluções construtivas com o valor de U idêntico. Neste contexto chegou-se à conclusão que a construção em LSF requer maiores necessidades anuais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e consequentemente maiores necessidades nominais anuais globais de energia primária.

Nos dois tipos de construção, as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento N_{vc} , são inferiores às necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento N_{ic} . Este facto pode dever-se a alguns fatores, como por exemplo, existirem no edifício soluções dedicadas à minimização de ganhos solares, como é o caso dos estores, que protegem da radiação solar direta nos envidraçados. Outro fator poderá estar relacionado com o clima do local (Aveiro) que é mais exigente no Inverno do que no Verão.

Quanto às perdas térmicas na estação de aquecimento, serão as pontes térmicas lineares, seguidas das paredes, que correspondem à maior percentagem de perdas em cada um dos tipos de construção. Estas PTL, que como não existe uma tabela com valores de coeficientes de transmissão térmica lineares Ψ para a construção em LSF, foram determinadas recorrendo a uma simplificação de utilizar a tabela de Ψ do REH, com o sistema de isolamento repartido. As pontes térmicas lineares desempenham um papel fulcral no desempenho térmico do edifício, pelo qual é uma área onde se deve ter um especial cuidado no sentido de reduzir as perdas de calor associadas. Tanto na estação de aquecimento como na estação de arrefecimento, as perdas térmicas são superiores na construção tradicional, pois a contabilização de PTP e da área de cada parede influencia para este resultado.

Para a estação de aquecimento, os ganhos térmicos totais brutos são iguais, variando apenas os ganhos totais úteis que dependem do fator de utilização de ganhos η , dependente da classe de inércia térmica do edifício. Assim, a construção tradicional apresenta uma maior quantidade de ganhos totais úteis (ganhos desejáveis na habitação). Relativamente à estação de arrefecimento, os ganhos totais brutos são superiores na construção tradicional, visto que a área da envolvente em ambas as construções difere. O tipo de construção tradicional inclui não só a contabilização da área das paredes como também das PTP relativas às vigas, pilares e caixa de estore, enquanto a construção em LSF apenas inclui a área das paredes e as PTP relativas à caixa de estore.

Em suma, utilizando o mesmo edifício, mas com métodos de construção diferentes, o fator fulcral será a inércia térmica. Utilizando a metodologia do REH, os parâmetros que são diferentes para os dois tipos de construção são a área das paredes, devido à diferente contabilização das PTP, o fator de utilização de ganhos η que é diferente para cada classe de

inércia térmica, e o fator solar global máximo admissível dos vãos envidraçados $g_{Tmáx}$. Relativamente ao consumo energético, a construção em LSF apresenta um consumo superior à construção tradicional (com o mesmo valor de U). Estas diferenças situaram-se em cerca de 11% de maiores necessidades relativas à energia útil para aquecimento N_{ic} e 73% relativas à energia útil para arrefecimento N_{vc} . Consequentemente, as necessidades nominais anuais globais de energia primária N_{tc} são cerca de 64% superiores na construção em LSF, comparativamente à construção tradicional.

De forma a aprofundar o estudo entre a diferenciação destes dois métodos construtivos no que respeita ao comportamento térmico e eficiência energética, seria conveniente retirar alguns meios de obstrução solar (estores) em vários elementos envidraçados de forma a perceber até que ponto o requisito mínimo $g_{Tmáx}$ iria criar problemas dependendo da classe de inércia térmica. Outro fator importante seria o estudo aprofundado de pontes térmicas lineares em construções segundo o sistema construtivo em LSF, tentando prever outras metodologias para o cálculo destas, visto que não existe nenhuma tabela onde se pode retirar os valores pré-definidos para o cálculo de Ψ . Estudar estratégias que aumentassem a inércia térmica da construção em LSF e a sua capacidade de armazenamento térmico. Por fim, um estudo detalhado relativo ao desempenho térmico e energético da comparação entre os dois tipos de construção, utilizando outro *software*, como por exemplo o DesignBuilder, que permite caracterizar o edifício realizando simulações dinâmicas avançadas para determinação dos consumos energéticos ao longo do ano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENE@(2017), <http://www.adene.pt>, Agência para a Energia, data da consulta: 12/3/2017
- Andrade, R. (2016) “Estudo comparativo entre construção tradicional e light steel framing (LSF)”, Tese de mestrado integrado, Universidade do Algarve, Algarve.
- Aste N., Angelotti A., Buzzetti M. (2009). “The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings”. *Energy and buildings* Vol 41, pp. 1181-1187 DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.06.005
- Batista E., Ghavami K. (2005). “Development os Brazilian steel construction”. *Journal of Constructional Steel Research* Vol. 61, pp. 1009-1024 DOI: 10.1016/j.jcsr.2005.02.011
- Burstrand, H. (1998). “Light-gauge steel framing leads the way to an increased productivity for residential housing”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 46, pp.183-186, DOI: 10.1016/S0143-974X (98)00141-2
- Decreto-lei nº 118/2013 de 20 de agosto, Certificação energética e ar interior edifícios, ANOTADO pela ADENE.
- Davison B., Owens G. W., (2003). *Steel Designer’s Manual: The Steel Construction Institute*, Blackwell Science, sixth edition, Department of Civil & Structural Engineering, The University of Sheffield.
- Despacho (extrato) n.º15793-I/2013. *Diário da República*, 2ª série- N.º234-3 de dezembro de 2013
- Despacho (extrato) n.º15793-K/2013. *Diário da República*, 2ª série- N.º234-3 de dezembro de 2013
- Doran S. M., Gorgolewski M. T. (2002). “U-values for steel-frame construction”. BREPress EN12369-1. Wood based panels – Characteristic values for structural design – Part : OSB, particleboards and fibre boards
- Norma EN1993-1-3 (2006), Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General Rules. CEN
- EnergyPlus@(2017), <https://energyplus.net/>, data da consulta: 07/11/2017
- Ferreira, M. (2014) “O sistema construtivo com estrutura leve em aço”, Tese de mestrado integrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Franco D., Alves G. (2006), “LSK Jornada Técnica” utilização de produtos em aço enformados a frio na construção, Porto.
- Futureng@(2017), <http://www.futureng.pt>, Engenharia e projeto, data da consulta: 17/10/2017
- Gervásio H., Santos P., Silva L., Lopes A. (2010). “Influence of thermal insulation on the energy balance for cold-formed buildings”. *Advanced Steel Construction* Vol. 6, pp. 742-766.
- Gorgolewski M. (2007). “Developing a simplified method of calculation U-values in light steel framing”. *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 230-236, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.001>

- Grubb P., Gergolewski M., Lawson R., (2001). *Building Design using Cold Formed Steel Sections – Light Steel Framing in Residential Construction*, The Steel Construction Institute, Publicação nº SCI P301, ISBN 1-85942-121-0.
- Hoes P., Hensen J., Loomans M., Vries B., Bourgeois D. (2009). “User behavior in whole building simulation”. *Energy and Buildings*, Vol 41, pp. 295-302 DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.09.008
- Hoglund T., Burstrandb H. (1998). “Slotted steel studs to reduce thermal bridges in insulated walls”. *Thin-Walled Structures*, Vol 32, pp.81-109 DOI: 10.1016/S0263-8231(98)00028-7
- ITeCons@(2017), <http://www.itecons.uc.pt> Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, data da consulta: 05/11/2017
- Jornal de Construção@(2013), *Construção na Europa começa a crescer lentamente em 2014*, 5 dezembro, disponível em <http://www.jornaldaconstrucao.pt/index.php?id=10&n=3804> , data da consulta: 11/4/2017
- Kesawan S., Mahendran M. (2015). “Fire tests of load-bearing LSF walls made of hollow flange channel sections”. *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 115, pp.191-205, DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.07.020
- Kossecka E., Kosny J. (2002). “Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building”. *Energy and Buildings*, Vol 34, pp.321-331, DOI: 10.1016/S0378-7788(01)00121-9
- Lee W., Kim K. (2014). “Improvement of floor impact sound on modular housing for sustainable building”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp.263-275, DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.054
- LSK. (2005). *European Lightweight Steel-framed Construction*. Arcelor.
- Luís M. (2013). “Light Steel frame: um percurso”. Investigadora do PI: Os Materiais de Arquitetura. <http://revistas.lis.ulsiada.pt/index.php/flm/article/view/282>
- Luxenburg, R. (2009). “Light Wood Frame Construction: Type 5 Construction”. Department of Architecture and Interior design, Anne Arundel Community College, EUA.
- Martins C., Santos P., Simões da Silva L. (2016) “Lightweight steel-framed thermal bridges mitigation strategies: a parametric study”. *Journal of Build Physics* , Vol. 39, pp.342-372, DOI: 10.1177/1744259115572130
- MASISA. (2003). *Painel estrutural OSB Masisa: recomendações práticas*. Catálogo. Ponta Grossa: Masisa,
- Moreira M., (2012). “Utilização de perfis enformados a frio em obras de reabilitação”. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Construção e Reabilitação, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Multisplit@(2017), <http://www.multisplit.net>, data da consulta: 06/11/2017
- Norma ISO 10211:2007, “Thermal bridges in building construction- Heat flows and surface temperatures- Detailed calculations”, ISO
- Norma ISO 13789:2007, “Thermal performance of buildings -- Transmission and ventilation heat transfer coefficients- Calculation method”, ISO

- Norma ISO 18292:2011, “Energy performance of fenestration systems for residential buildings- Calculation procedure”, ISO
- Norma ISO 6946:2007, “Building components and building elements- Thermal resistance and thermal transmittance- Calculation method”, ISO
- Norma NP1037-1 (2002), “Ventilação e evacuação dos produtos de combustão dos locais com aparelhos a gás- Part 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural”, IPQ
- Norma EN 13229:2001, “Inset appliances including open fires fired by solid fuels- Requirements and test methods”, CEN
- Norma EN 13240:200/A2:2004, “Room heaters fired by solid fuel- Requirements and test methods”, CEN
- Norma EN 14785:2006, “Residential space heating appliances fired by wood pellets- Requirements and test methods”, CEN
- Silva L., (2016) “Opinião: o setor da construção metálica”. Consultado em 2017, abril 17 em <http://www.construir.pt/2016/12/02/opiniao-o-sector-da-construcao-metalica/>
- Panão M. (2008). “Desempenho térmico dos edifícios na cidade: física dos edifícios e clima urbano”. Cidades e Alterações climáticas. Que futuro? CEG, Universidade de Lisboa.
- Patrício J., (2003). “A acústica nos edifícios”. LNEC, Lisboa.
- Plastimar@ (2011), <http://www.plastimar.pt>, A synbra company, data da consulta: 12/3/2017
- Portaria n.º 349-B/2013. Diário da República, 1ª série - n.º232 - 29 de novembro de 2013. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia. Lisboa
- Quercus@ (2009), <http://www.quercus.pt>, Associação Nacional de Conservação da Natureza, data da consulta: 12/4/2017
- RCCTE- “Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios”, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de fevereiro.
- REH (Decreto-Lei n.º80/2006) “Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação”, publicado pelo Decreto-Lei n.º.118/2013, de 20 de agosto.
- REH- “Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação”, publicado pelo Decreto-Lei n.º.28/2016, de 23 de junho.
- Saffari M., Gracia A., Ushak S., Cabeza L. (2016). “Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using fanger Comfort model”. Energy and Buildings. Vol 112, pp. 159-172 DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.12.006
- Santiago A., Freitas A., Castro R. (2012). “Manual de Construção em Aço Steel Framing: Arquitetura” 2ª Edição, Rio de Janeiro.
- (ITE50) Santos C., Matias L. (2009). “Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios, Informação Técnica de Edifícios”, Lisboa.
- Santos P., Gervásio H., Simões da Silva L., Gameiro A., Murtinho V. (2010), “Energy performance and thermal behaviour of light steel buildings” Portugal Sustainable Building Affordable to All Low Cost Sustainable Solutions, Chapter 3 pp:321-328

- Santos P., Silva L. S., Ungureanu V., (2012). Energy Efficiency of Light-Weight Steel - Framed Buildings. Nº129, 1ª Edição, ECCS – European Convention of Constructional Steelwork, ISBN 978-92-9147-105-8.
- Silvestre N., Pires J., Santos A., (2013). “Manual de Conceção de Estruturas e Edifícios em LSF- Light Steel Framing”. Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.
- Simões, N., Mateus, D. (2017). “Comportamento Térmico e Energético de Edifícios”. Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, edição de 2016/2017, Coimbra.
- SEEP@(2017), <http://www.seep.pt>, Sistema de Etiquetagem Energética de Produtos, data da consulta: 01/11/2017
- Soares N., Santos P., Gervásio H., Costa J.J., Silva L. S. (2017). “Energy Efficiency and thermal performance of lightweight steel -framed (LSF) construction: A review”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 78, pp. 194-209, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.066>
- SOFERRAGENS@(2017), <http://www.soferragens.pt>, Materiais de construção, data da consulta:14/12/2017
- Stazi F., Bonfigli C., Tomassoni E., Perna C., Munafó P. (2015). “The effect of high thermal insulation on high thermal mass: Is the dynamic behaviour of traditional envelopes in Mediterranean climates still possible?”. Energy and Buildings, Vol 88, pp. 367-383 DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.11.056
- (SCI), (1997). Steel Construction Institute, Building design using cold formed steel sections: construction detailing and practice. Ascot, The Steel Construction Institute
- THERM@(2003), <https://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html> , data da consulta:05/11/2017
- Verbeke S., Audenaert A. (2017). “Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.083
- Way A. G. J., Kendrick C. (2008). “Avoidance of thermal bridging in steel construction”. The Steel Construction Institute, Berkshire.

ANEXOS

ANEXO A

Representação de imagens fornecidas pela ferramenta THERM, indicando o valor do U em cada etapa, juntamente com a espessura de lã de rocha utilizada (que foi o único material a variar na análise). Estão também indicadas as temperaturas utilizadas no *software*, no espaço exterior 0°C e no espaço interior 20°C . Os elementos de divisão com o espaços não-úteis apresentam uma temperatura de 20°C no espaço interior e uma temperatura de 18°C no espaço não útil, isto devido ao facto da ferramenta não fazer o cálculo entre elementos com temperaturas iguais. Segue-se a legenda da constituição de cada elemento.

- | | |
|--|--|
| ■ Poliestireno expandido | ■ Perfil metálico |
| ■ OSB | ■ Poliestireno extrudido |
| ■ Lã de rocha | □ Espaço de ar |
| ■ Placa de gesso | ■ Acabamento final do sistema ETICS |

Figura A.1- Representação da parede exterior.

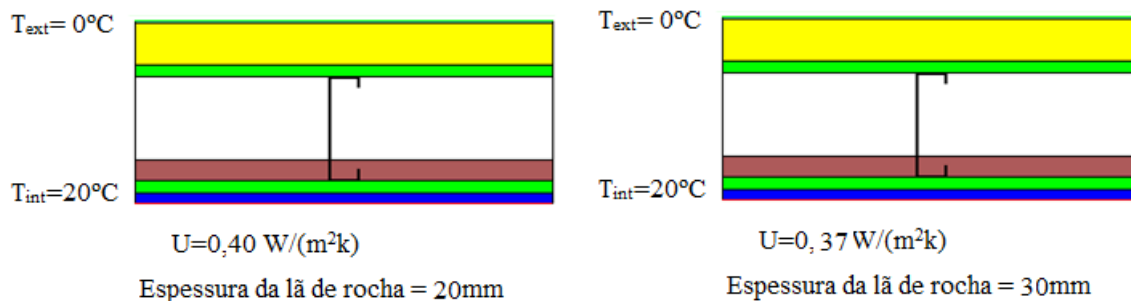


Figura A.2- Representação da parede de separação com a garagem.

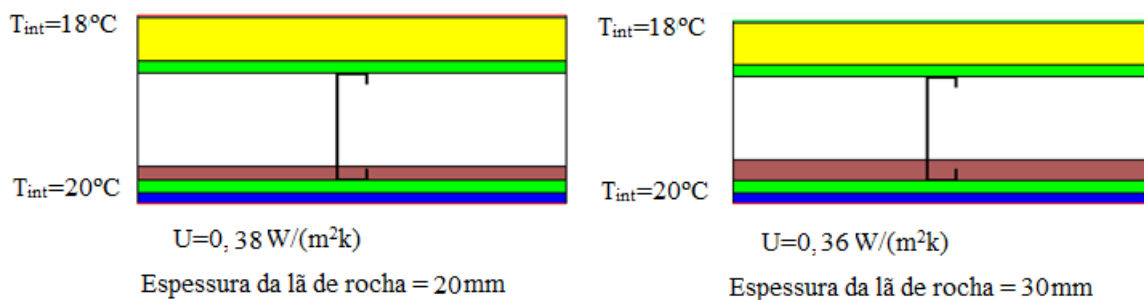


Figura A.3- Representação da parede de separação com o espaço não útil (sótão).

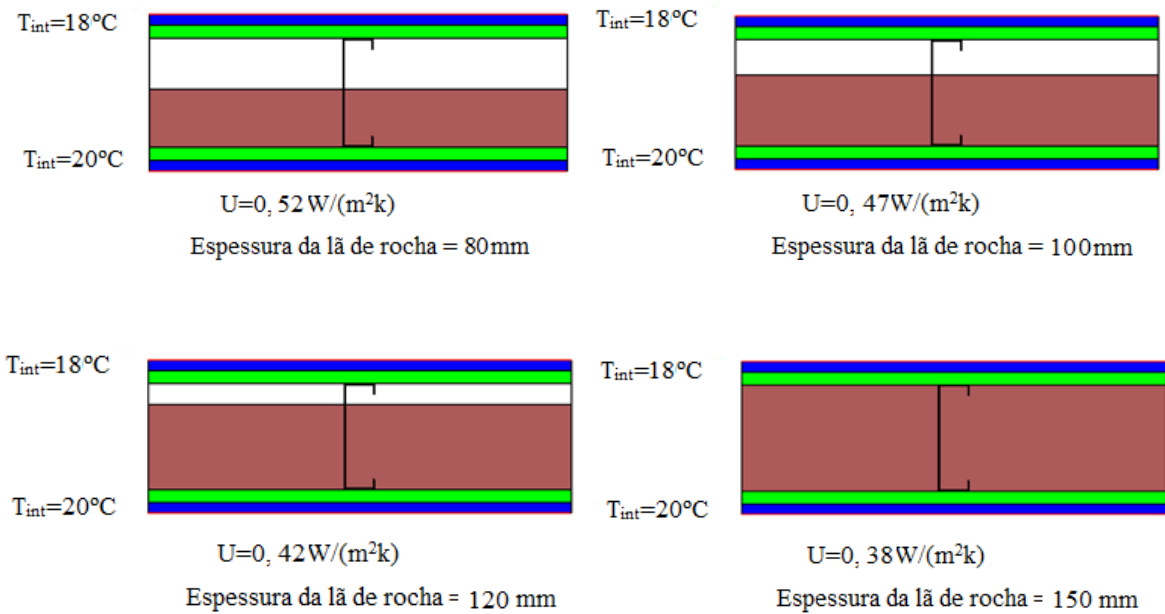


Figura A.4- Representação da cobertura

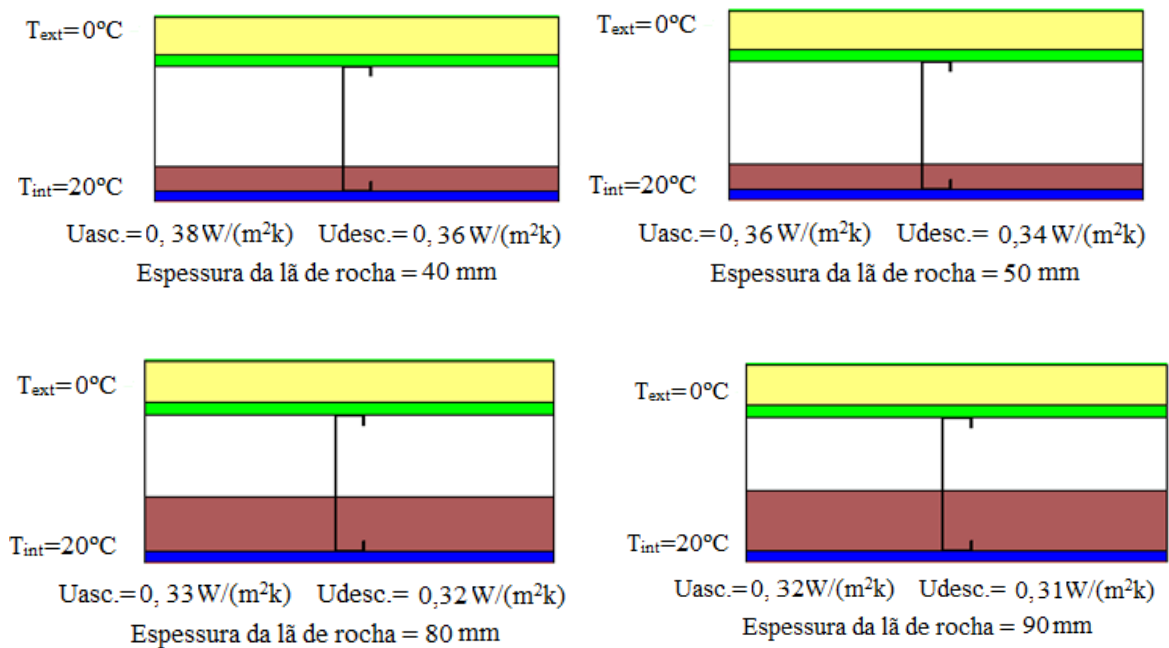
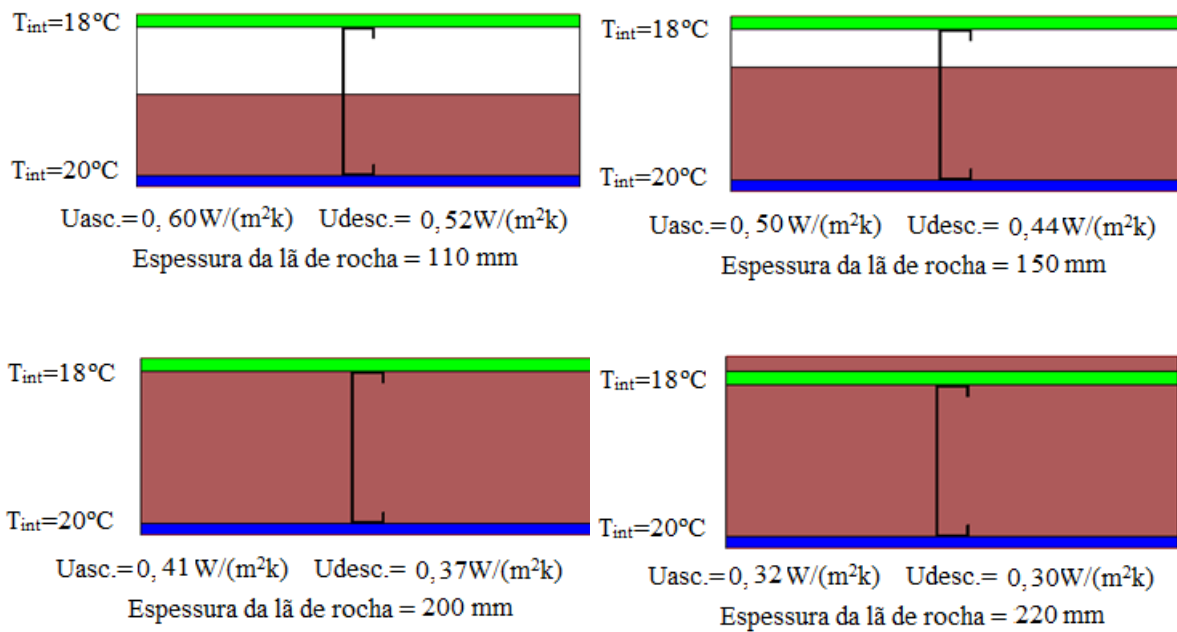


Figura A.5- Representação da laje de esteira.



ANEXO B

O cálculo efetuado para a obtenção do coeficiente de transmissão térmica na construção em LSF, segundo o método desenvolvido por Gorgolewski (2007), apresenta-se detalhado no Quadro B.1.

Quadro B.1- Cálculo do U segundo o método (Gorgolewski, 2007).

Tipo de estrutura	LSF	Espessura perfil [mm]	distância [mm]	fração	Área fração do aço	%	Área fração isolamento	%	Resist. Sem aço [m ² K/W]	Resist. Incluindo aço [m ² K/W]	hRmax. [W/m ² K]	Rmax. [m ² K/W]	Resist. lâ rocha e espaço ar [m ² K/W]	Resist. Aço [m ² K/W]	Cond. Camada em ponte [W/m ² K]	Resist. da camada em ponte [m ² K/W]	Rmin [m ² K/W]	d [mm]	s [mm]	p	Rt [m ² K/W]	U [W/m ² K]
Híbrida	PDE1	1,50	600	0,0025	0,0025	0,25	1,00	99,75	2,91	2,01	0,34	2,90	0,89	0,003	1,95	0,51	2,53	150	600	0,76	2,81	0,36
Híbrida	CBE1 asc.	2,00	600	0,0033	0,0033	0,33	1,00	99,67	4,27	1,97	0,24	4,25	2,30	0,004	1,27	0,79	2,76	200	600	0,56	3,59	0,28
Híbrida	CBE1 desc.	2,00	600	0,0033	0,0033	0,33	1,00	99,67	4,40	2,04	0,23	4,38	2,36	0,004	1,26	0,80	2,84	200	600	0,56	3,70	0,27
Híbrida	PDI1	1,50	600	0,0025	0,0025	0,25	1,00	99,75	3,00	2,10	0,33	2,99	0,89	0,003	1,95	0,51	2,62	150	600	0,76	2,90	0,34
Fria	PDI2	1,50	600	0,0025	0,0025	0,25	1,00	99,75	4,23	0,66	0,24	4,17	3,57	0,003	1,11	0,90	1,56	150	600	0,36	2,50	0,40
Fria	CBI1 asc.	2,00	600	0,0033	0,0033	0,33	1,00	99,67	5,64	0,88	0,18	5,54	4,76	0,004	1,04	0,96	1,84	200	600	0,31	2,97	0,34
Fria	CBI1 desc.	2,00	600	0,0033	0,0033	0,33	1,00	99,67	5,78	1,02	0,18	5,69	4,76	0,004	1,04	0,96	1,98	200	600	0,32	3,16	0,32