

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Telmo Miguel Martins Ribeiro

ISOLAMENTOS TÉRMICOS PARA A CONSTRUÇÃO EM ESTRUTURA METÁLICA LEVE (LSF)

THERMAL INSULATIONS FOR LIGHTWEIGHT STEEL-FRAMED (LSF) CONSTRUCTION

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor 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.

22 de julho de 2020

1 2 9 0



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA



Este trabalho foi realizado com o apoio do Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE) e teve o financiamento enquadrado no projeto PTDC/ECI-EGC/32061/2017 – Tyre4BuildIns – *Recycled Tyre Rubber Resin-Bonded for Building Insulation Systems Towards Energy Efficiency*, financiado por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do COMPETE.

AGRADECIMENTOS

Reservo este espaço para endereçar os meus sinceros agradecimentos às peças fundamentais que tornaram possível concluir, com sucesso, esta dissertação e o meu percurso académico.

Aos meus pais pelos valores e educação que me transmitiram, por permitirem que tudo isto fosse possível, e por proporcionarem, sempre, as melhores condições possíveis ao longo da minha vida.

Ao meu irmão, por toda a amizade e por ter estado sempre presente.

À minha namorada Lara, pelo amor, pelo equilíbrio e por estar sempre por perto quando mais preciso.

Ao meu orientador Prof. Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos, pela forma impecável com que me tratou desde o momento em que decidi realizar a dissertação sob sua orientação, pela disponibilidade demonstrada em todos os momentos, pelas valiosas orientações que permitiram tomar as decisões mais acertadas, e por todos os conhecimentos transmitidos.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra que fizeram parte do meu percurso académico, por me terem proporcionado um ensino de qualidade na área da Engenharia Civil.

Ao Miguel, por ter sido um amigo e colega importantíssimo nos últimos anos do curso, pelo estudo em conjunto, pelas dúvidas debatidas e por termos sido o incentivo um do outro que permitiu que ultrapassássemos, com qualidade, todas as dificuldades que surgiram.

E a todos os outros que, de alguma forma, estiveram presentes no meu percurso académico e contribuíram para que esta etapa fosse concluída com sucesso.

Obrigado!

RESUMO

A necessidade de aumentar a eficiência energética dos edifícios tem-se tornado prioritária, uma vez que este setor é responsável por uma grande parte do consumo de energia e das emissões de gases de efeito de estufa totais no mundo. Aproveitando as enormes potencialidades para a melhoria da eficiência energética dos edifícios e através de um projeto e conceção apropriados da envolvente e das suas componentes, é possível reduzir, de forma eficaz, as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento dos espaços interiores.

Nesse sentido, um dos elementos mais importantes para a obtenção de consumos de energia mais eficientes nas construções são os materiais de isolamento térmico. Os consumos de energia destinados a manter o conforto térmico dos espaços interiores podem ser reduzidos através de uma escolha adequada e uma correta aplicação dos materiais de isolamento térmico a utilizar nas construções, uma vez que este tipo de materiais permite diminuir significativamente os fluxos de calor através da envolvente.

Na construção em estrutura metálica leve (LSF), os materiais de isolamento térmico apresentam as importantes funções de reduzir as perdas de calor pela envolvente, de tratar as pontes térmicas originadas pela elevada condutibilidade térmica do aço e de diminuir o risco de ocorrência de condensações, tratando-se, assim, de um elemento essencial para a melhoria do desempenho térmico e energético deste sistema construtivo.

No presente trabalho realiza-se uma revisão do estado-da-arte sobre soluções de isolamento térmico para aplicação na construção em LSF. Numa primeira parte, efetua-se uma descrição do sistema construtivo em LSF e do modo como os materiais de isolamento térmico influenciam o desempenho térmico deste tipo de construção. Numa segunda parte, procede-se à identificação, caracterização e apresentação das vantagens e inconvenientes de materiais de isolamento térmico com potencialidades para serem aplicados neste sistema construtivo, abordando-se não só as soluções de isolamento tipicamente utilizadas, mas também outras soluções alternativas e materiais inovadores existentes no mercado.

Palavras-chave: sistema construtivo em LSF; materiais de isolamento térmico; desempenho térmico; eficiência energética.

ABSTRACT

The need to increase the energy efficiency of buildings has become a priority, as this sector is responsible for a large part of the world's total energy consumption and greenhouse gas emissions. By harnessing the enormous potential for improving the energy efficiency of buildings and through the appropriate design and conception of the envelope and its components, it is possible to effectively reduce the energy needs for heating and cooling of indoor spaces.

Hence, one of the most important elements for more efficient energy consumption in buildings are thermal insulation materials. The energy consumption to maintain the thermal comfort of indoor spaces can be reduced through proper choice and correct application of the thermal insulation materials to be used in the constructions, as this type of material allows significantly reduce heat flows through the envelope.

In lightweight steel-framed (LSF) construction, thermal insulation materials have the important functions of reducing heat losses through the envelope, treating thermal bridges caused by the high thermal conductivity of steel and reducing the risk of condensation, thus being an essential element for improving the thermal and energy performance of this construction system.

In the present work, a state-of-the-art review is carried out on thermal insulation solutions for application in LSF construction. In a first part, a description is made of the LSF construction system and the way thermal insulation materials influence the thermal performance of this type of construction. In a second part, the identification, characterization and presentation of the advantages and disadvantages of thermal insulations materials with potential to be applied in this construction system is carried out, addressing not only the insulation solutions typically used, but also other alternative solutions and innovative materials on the market.

Keywords: lightweight steel-framed (LSF) construction; thermal insulations materials; thermal performance; energy efficiency.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da dissertação	3
2	O SISTEMA CONSTRUTIVO EM LSF	4
2.1	Enquadramento	4
2.2	Métodos de assemblagem da construção em LSF	5
2.3	Materiais de construção	6
2.3.1	Tipos de materiais	6
2.3.2	Perfis de aço enformados a frio	7
2.3.3	Painéis de revestimento	7
2.3.4	Elementos de fixação	8
2.3.5	Materiais de isolamento térmico	9
2.3.6	Membranas de estanqueidade ao ar	10
2.3.7	Camadas de acabamento	11
3	DESEMPENHO TÉRMICO DO SISTEMA CONSTRUTIVO EM LSF	12
3.1	Enquadramento	12
3.2	Coeficiente de transmissão térmica dos elementos em LSF	13
3.3	Pontes térmicas	14
3.4	Inércia térmica	16
3.5	Eficiência dos materiais de isolamento térmico em função da sua posição	17
3.5.1	Classificação dos elementos construtivos	17
3.5.2	Desempenho térmico em função do tipo de construção	18
4	MATERIAIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO	22
4.1	Enquadramento	22
4.2	Classificação dos materiais de isolamento	22
4.3	Caraterização dos materiais de isolamento	24
4.3.1	Caraterização térmica	24
4.3.2	Caraterização acústica	26

4.3.3 Caraterização ambiental	28
4.3.4 Comportamento ao fogo.....	29
4.3.5 Permeabilidade ao vapor de água.....	30
4.4 Soluções de isolamento térmico convencionais.....	30
4.4.1 Lã de rocha.....	30
4.4.2 Poliestireno expandido (EPS)	33
4.5 Soluções de isolamento térmico alternativas	35
4.5.1 Fibra de celulose	35
4.5.2 Lã de ovelha	37
4.6 Soluções de isolamento térmico inovadoras.....	40
4.6.1 Aerogel.....	40
4.6.2 Painéis de isolamento a vácuo (VIPs).....	44
4.7 Principais vantagens e inconvenientes.....	52
4.8 Análise comparativa	53
5 CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura de uma moradia construída em LSF (Perfisa, 2020).....	4
Figura 2.2 – Métodos de assemblagem da construção em LSF (Grubb <i>et al.</i> , 2001).....	5
Figura 2.3 – Secções transversais de perfis de aço enformados a frio (LSK, 2005).....	7
Figura 2.4 – Painéis de revestimento: a) placas OSB; b) placas de gesso cartonado (Futureng, 2020).....	8
Figura 2.5 – Parafusos auto-perfurantes (Santos <i>et al.</i> , 2012).....	9
Figura 2.6 – Métodos de ligação: a) perfil-perfil; b) painel-perfil (LSK, 2005).....	9
Figura 2.7 – Materiais de isolamento térmico: a) Lã de rocha; b) Poliestireno expandido (Pereira e Santos, 2019).....	10
Figura 2.8 – Membrana de estanqueidade ao ar (Soares <i>et al.</i> , 2017).....	11
Figura 2.9 – Camada de acabamento em ETICS (Perfisa, 2020).....	11
Figura 3.1 – Estratégias de mitigação de pontes térmicas: a) perfis metálicos com perfurações longitudinais; b) bandas de borracha; c) perfis metálicos de banzos modificados (adaptada de Pereira e Santos, 2019).....	15
Figura 3.2 – Estratégias para aumentar a inércia térmica: a) implementação de uma caixa de pedras; b) aproveitamento da inércia térmica do solo; c) utilização de PCMs (adaptada de Pereira e Santos, 2019).....	17
Figura 3.3 – Tipos de construção em LSF consoante o posicionamento do isolamento térmico. Materiais: 1 – gesso cartonado; 2 – OSB; 3 – Lã de rocha; 4 – ar; 5 – acabamento em ETICS; 6 – LSF; 7 – EPS (adaptada de Roque e Santos, 2017).....	18
Figura 3.4 – Efeito das pontes térmicas em função do tipo de construção (adaptada de Atsonios <i>et al.</i> , 2018).....	19
Figura 3.5 – Classificação das construções em LSF em função da posição dos materiais de isolamento térmico. Materiais: 1 – gesso cartonado; 2 – OSB; 3 – Lã de rocha; 4 – ar; 5 – acabamento em ETICS; 6 – LSF; 7 – EPS (adaptado de Santos <i>et al.</i> , 2014).....	19
Figura 3.6 – Distribuição de temperaturas nas secções transversais das paredes (adaptada de Santos <i>et al.</i> , 2014).....	20

Figura 3.7 – Valores dos coeficientes de transmissão térmica obtidos para os três tipos de construção e comparação com os limites impostos pelo REH, para as três zonas climáticas I1, I2 e I3 (adaptada de Roque e Santos, 2017).....	21
Figura 4.1 – Classificação dos materiais de isolamento térmico de acordo com a forma: a) espumas projetáveis; b) mantas; c) placas rígidas	23
Figura 4.2 – Classificação dos materiais de isolamento térmico de acordo com a sua composição (adaptada de Papadopoulos, 2005)	24
Figura 4.3 – Metodologia de análise do ciclo de vida.	28
Figura 4.4 – Lã de rocha (Thermal Engineering, 2020a).	30
Figura 4.5 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica da lã de rocha e influência de cada modo de transferência de calor em função da temperatura de operação (adaptada de Karamanos <i>et al.</i> , 2008).....	31
Figura 4.6 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica da lã de rocha em função da temperatura de operação (adaptada de Abdou e Budaiwi, 2005).....	32
Figura 4.7 – Placas de EPS (Thermal Engineering, 2020b)	33
Figura 4.8 – Grãos de poliestireno: a) antes do processo de expansão; b) após o processo de expansão (Insulation Corporation of America, 2020).....	33
Figura 4.9 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica do EPS em função do teor de humidade (adaptada de Jerman e Černý, 2012).....	34
Figura 4.10 – Fibra de celulose (Epicentro, 2020)	35
Figura 4.11 – Aplicação de fibras de celulose por projeção (DDN, 2020)	36
Figura 4.12 – Lã de ovelha como material de isolamento (Build It, 2020).....	37
Figura 4.13 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica da lã de ovelha em função da massa volúmica (adaptada de Zach <i>et al.</i> , 2012).....	38
Figura 4.14 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica da lã de ovelha em função da temperatura de operação (adaptada de Zach <i>et al.</i> , 2012).....	38
Figura 4.15 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica em função do teor de humidade (adaptada de Zach <i>et al.</i> , 2012)	39
Figura 4.16 – Aerogel (NASA, 2020)	40
Figura 4.17 – Material de isolamento de aerogel em forma de manta (Jelle <i>et al.</i> , 2015)	41
Figura 4.18 – Transmissão de radiação nos aerogéis de sílica (adaptada de Jelle <i>et al.</i> , 2015).....	42

Figura 4.19 – Aplicação de aerogel em fachadas e coberturas para aproveitamento de luz natural (Kalwall, 2020).....	42
Figura 4.20 – Comparação entre os ganhos de espaço e o custo de materiais de isolamento convencionais e os aerogéis (adaptada de Koebel e Rigacci, 2012).....	43
Figura 4.21 – Comparação entre os valores de energia incorporada e da espessura para o aerogel e materiais de isolamento convencionais (Cuce <i>et al.</i> , 2014).....	44
Figura 4.22 – Painel de isolamento a vácuo (Green Building Advisor, 2020).....	44
Figura 4.23 – Estrutura dos painéis de isolamento a vácuo (adaptada de Alam <i>et al.</i> , 2011)..	45
Figura 4.24 – Variação da condutibilidade térmica pelo meio gasoso em função do diâmetro - dos poros e da pressão de gás (adaptada de Alam <i>et al.</i> , 2011).....	45
Figura 4.25 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica de vários materiais de isolamento em função da pressão de gás (Baetens <i>et al.</i> , 2010).....	46
Figura 4.26 – Espessuras de diferentes isolamentos térmicos necessárias para alcançar determinados valores de U, considerando uma parede de alvenaria típica com um valor U de $0,53 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (adaptada de Alam <i>et al.</i> , 2011).....	47
Figura 4.27 – Variação do coeficiente de absorção sonora α e da redução sonora R de elementos de sanduíche com VIPs de massa superficial igual a 15 kg/m^2 em função da frequência de onda (adaptada de Baetens <i>et al.</i> , 2010).....	48
Figura 4.28 – Balanço monetário, em função do valor de mercado de área útil, resultante da aplicação de VIPs em detrimento de lã mineral como material de isolamento térmico, considerando uma redução da espessura de parede igual a 20 cm (adaptada de Jelle, 2011).....	49
Figura 4.29 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica de VIPs com núcleo de sílica fumada em função do tempo de utilização dos painéis. Consideração de dois tamanhos diferentes de painéis (50 cm x 50 cm x 1 cm e 100 cm x 100 cm x 2 cm) e de três tipos diferentes de invólucros (AF, MF1 e MF2) (adaptada de Jelle, 2011).....	50
Figura 4.30 – Consumo de energia primária e potencial de aquecimento global associados aos três modelos analisados (adaptada de Karami <i>et al.</i> , 2015).....	51
Figura 4.31 – Coeficiente de condutibilidade térmica de materiais de isolamento térmico existentes no mercado.....	54

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Vantagens de cada um dos métodos de montagem da construção em LSF (Soares <i>et al.</i> , 2017).....	6
Quadro 4.1 – Métodos de avaliação dos parâmetros relacionados com a caracterização térmica dos materiais de isolamento.....	25
Quadro 4.2 – Métodos de avaliação do coeficiente de absorção sonora de materiais	27
Quadro 4.3 – Métodos de avaliação dos parâmetros de análise do isolamento sonoro de soluções construtivas	27
Quadro 4.4 – Indicadores utilizados na Análise de Ciclo de Vida de materiais e produtos.....	29
Quadro 4.5 – Parâmetros utilizados na definição da classificação de reação ao fogo segundo a norma europeia EN 13501-1	29
Quadro 4.6 – Principais vantagens e inconvenientes da lã de rocha, do poliestireno expandido, da fibra de celulose, da lã de ovelha, do aerogel e dos painéis de isolamento a vácuo.....	52
Quadro 4.7 – Outras propriedades de materiais de isolamento térmico existentes no mercado	55

SIMBOLOGIA

- μ – Fator de resistência à permeação ao vapor de água [-]
- A – Área do elemento, perpendicular ao fluxo de calor [m^2]
- e – Espessura [m]
- E_a – Energia acústica absorvida [J]
- E_i – Energia acústica incidente [J]
- E_r – Energia acústica refletida [J]
- E_t – Energia acústica transmitida [J]
- K_p – Condutância térmica [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
- Q – Fluxo de calor [W]
- R – Resistência térmica [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]
- R_{se} – Resistência térmica superficial exterior [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]
- R_{si} – Resistência térmica superficial interior [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]
- s_d – Espessura da camada de ar equivalente [m]
- T_e – Temperatura do ambiente exterior [K]
- T_i – Temperatura do ambiente interior [K]
- U – Coeficiente de transmissão térmica [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
- α – Coeficiente de absorção sonora [-]
- λ – Coeficiente de condutibilidade térmica [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
- λ_c – Parcela do coeficiente de condutibilidade térmica relativa à transferência de calor por convecção [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
- λ_g – Parcela do coeficiente de condutibilidade térmica relativa à transferência de calor pelo meio gasoso [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
- λ_r – Parcela do coeficiente de condutibilidade térmica relativa à transferência de calor por radiação [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
- λ_s – Parcela do coeficiente de condutibilidade térmica relativa à transferência de calor pelo meio sólido [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

ABREVIATURAS

- ACV – Análise de Ciclo de Vida
- AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
- EPS – “*Expanded Polystyrene*” (Poliestireno expandido)
- ETICS – “*External Thermal Insulation Composite System*” (Sistema de Isolamento Térmico pelo Exterior)
- IPCC – “*Intergovernmental Panel on Climate Change*” (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
- LSF – “*Lightweight Steel-framed*” (Estrutura metálica leve)
- OSB – “*Oriented Strand Board*” (Painel de tiras de madeira orientadas)
- PCM – “*Phase Change Materials*” (Materiais de mudança de fase)
- PEAD – Polietileno de Alta Densidade
- PEBD – Polietileno de Baixa Densidade
- PET – Politereftalato de Etileno
- PIR – Poliisocianurato
- PP – Polipropileno
- PUR – Poliuretano
- REH – Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
- VIP – “*Vacuum Insulation Panels*” (Painéis de Isolamento a Vácuo)
- XPS – “*Extruded Polystyrene*” (Poliestireno Extrudido)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A implementação de um desenvolvimento sustentável deve ser o objetivo basilar da humanidade. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2020), o consumo de energia global tem vindo a aumentar, registando-se um acréscimo de cerca de 3500 milhões de toneladas equivalentes de petróleo nas últimas três décadas. Para além disso, a previsão é de que nos próximos anos as necessidades energéticas aumentem de forma significativa, como resultado do intensivo desenvolvimento de alguns países, e das respetivas atividades industriais e urbanas, e do aumento exponencial da população mundial que se tem verificado nos últimos tempos. De forma a contrariar esta tendência, ao longo das últimas décadas, várias medidas de dimensão internacional e nacional têm sido criadas e implementadas com o objetivo de promover consumos de energia mais eficientes e de garantir um futuro mais sustentável para o planeta (Schiavoni *et al.*, 2016).

Analisando as necessidades energéticas por setor, verifica-se que o uso de energia pelos edifícios representa uma grande parte do consumo de energia e das emissões de gases de efeito de estufa totais no mundo, pelo que a necessidade de aumentar a eficiência energética nesta área tem-se tornado prioritária (Jelle, 2011). Segundo dados da Comissão Europeia (European Commission, 2016), o consumo de energia na Europa pelo setor residencial representa cerca de 30% das necessidades energéticas totais, e aproximadamente 60% dessa energia é utilizada para aquecimento do ambiente interior. No entanto, apesar dos grandes consumos de energia para atingir o conforto térmico desejado, os edifícios possuem um enorme potencial de eficiência energética que ainda não foi explorado na sua totalidade. Nesse sentido, através de uma conceção e de um projeto apropriados da envolvente dos edifícios e das suas componentes, é possível diminuir de forma eficaz as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento dos espaços interiores.

Os materiais de isolamento térmico constituem-se como uma das ferramentas mais valiosas para a obtenção de consumos de energia mais eficientes nas construções. A escolha dos materiais de isolamento térmico mais adequados e a sua correta aplicação na envolvente de um edifício podem contribuir para reduzir significativamente os consumos de energia destinados a manter o conforto térmico dos espaços interiores, na medida em que estes permitem reduzir os fluxos de calor através da envolvente. Em climas frios, onde não é desejável que existam grandes perdas de calor pela envolvente, os materiais de isolamento térmico apresentam um

papel fundamental no desempenho térmico das construções, funcionando como uma barreira à passagem de calor do ambiente interior para o ambiente exterior, e permitindo, desta forma, que o nível de conforto térmico pretendido seja alcançado em paralelo com consumos de energia para fins de aquecimento mais reduzidos.

No sistema construtivo em LSF (sigla proveniente do inglês e que significa *Lightweight Steel-Framed*), o desempenho térmico depende fortemente dos materiais de isolamento térmico aplicados. Embora este sistema construtivo apresente inúmeras vantagens que contribuem para a promoção da sustentabilidade no setor das construções, o conforto térmico e a eficiência energética podem ser bastante condicionados quando não se realiza um adequado tratamento de alguns aspetos negativos inerentes a este tipo de construção. O elevado coeficiente de condutibilidade térmica do aço faz com que os perfis metálicos estruturais da construção leve em aço favoreçam as trocas de calor entre o ambiente interior e exterior, podendo isso significar graves problemas para a manutenção do conforto térmico desejado. Para além disso, o baixo peso característico deste tipo de construção, comparativamente, por exemplo, com as construções em betão armado e alvenaria de tijolo cerâmico, confere uma baixa inércia térmica que poderá originar elevadas flutuações da temperatura interior em resposta às variações térmicas externas. Os materiais de isolamento térmico apresentam, então, a importante função de reduzir as perdas de calor, de tratar as pontes térmicas, de diminuir o risco de ocorrência de condensações e de possibilitar aumentar a inércia térmica (quando integrados, por exemplo, no sistema ETICS), dependendo esses aspetos não só do tipo de materiais de isolamento térmico utilizado, como também da sua configuração nos elementos construtivos.

Tendo em consideração a elevada influência dos materiais de isolamento térmico no desempenho térmico e energético das construções em estrutura metálica leve, é importante estudar soluções alternativas que permitam otimizar a eficiência deste tipo de construção. A aplicação de materiais de isolamento com um desempenho superior, não apenas termicamente, mas também ao nível da acústica, do comportamento ao fogo e dos aspetos ambientais, pode tornar a construção em estrutura metálica leve ainda mais competitiva e sustentável.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal realizar uma revisão do estado-da-arte sobre soluções de isolamento térmico para aplicação na construção em estrutura metálica leve (LSF). Este trabalho irá incidir na identificação e caracterização de materiais de isolamento térmico existentes no mercado atualmente, não apenas os mais convencionais, mas também materiais alternativos e materiais mais recentes e inovadores, pretendendo-se também identificar as principais vantagens e inconvenientes de cada um.

Para tal, numa primeira parte realiza-se um enquadramento do tema através de uma descrição do sistema construtivo em LSF e do modo como os materiais de isolamento térmico influenciam o desempenho térmico deste tipo de construção. Numa segunda parte, procede-se à identificação e caracterização de materiais de isolamento térmico com potencialidades para serem aplicados na construção em LSF. A caracterização incide sobre a vertente térmica, acústica, de comportamento ao fogo, ambiental e de permeabilidade ao ar, e são identificadas as principais vantagens e desvantagens da aplicação de cada material de isolamento térmico à construção em LSF.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos.

No capítulo inicial, Capítulo 1 – Introdução - realiza-se um enquadramento geral sobre o tema retratado, identificam-se os objetivos principais delineados para este trabalho e descreve-se a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 – O sistema construtivo em LSF – tem como finalidade principal realizar uma descrição geral do sistema construtivo LSF, identificando os materiais constituintes, os métodos de montagem utilizados e as principais vantagens e desvantagens associadas a este tipo de construção.

Por sua vez, o Capítulo 3 – Desempenho térmico do sistema construtivo em LSF – aborda o comportamento térmico da construção em LSF. Neste capítulo realiza-se uma revisão acerca da determinação do coeficiente de transmissão térmica de elementos construtivos, apresenta-se os principais aspetos relacionados com as pontes térmicas e a inércia térmica das construções em LSF e analisa-se a influência que a configuração dos materiais de isolamento térmico nos elementos construtivos possui no desempenho térmico da construção.

No Capítulo 4 – Materiais de isolamento térmico – procede-se, numa primeira parte, à descrição das principais formas de caracterização dos materiais de isolamento térmico. Numa segunda parte, realiza-se a identificação e caracterização dos materiais de isolamento térmico tipicamente utilizados no sistema construtivo em LSF e de quatro outros materiais com potencialidades para serem aplicados neste tipo de construção. No final deste capítulo, inclui-se também, de forma resumida, a identificação, caracterização e comparação de um conjunto de outros materiais de isolamento térmico existentes no mercado.

Por fim, no Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros – apresentam-se as principais conclusões resultantes desta dissertação.

2 O SISTEMA CONSTRUTIVO EM LSF

2.1 Enquadramento

O sistema construtivo em LSF, construção em LSF ou construção leve em aço é um sistema construtivo no qual a estrutura principal é composta por perfis metálicos de aço galvanizado enformados a frio (Figura 2.1). Os perfis metálicos deste tipo de construção, produzidos a partir de chapas de aço de espessura reduzida, não só proporcionam uma resistência elevada, como também apresentam uma leveza considerável. Este tipo de construção tem demonstrado uma tendência de crescimento, apresentando uma vasta aplicação em países como os Estados Unidos da América, Japão e Austrália, e encontra-se a ganhar espaço também no mercado europeu (Soares *et al.*, 2017).



Figura 2.1 – Estrutura de uma moradia construída em LSF (Perfisa, 2020).

Inúmeras vantagens estão associadas à construção leve em aço, de onde se destacam: i) o reduzido peso global da construção; ii) a elevada resistência mecânica oferecida pelos perfis de aço aliada ao seu baixo peso; iii) o rigoroso controlo de qualidade proporcionado pela produção em fábrica; iv) o elevado potencial de reciclagem e de reutilização do aço, possibilitando um final de ciclo de vida sustentável desse material; v) a adaptação a uma economia de produção em massa; vi) as facilidades de transporte e de montagem; vii) o facto de ser um sistema construtivo “seco”, fazendo com que o risco de patologias relacionadas com a humidade seja reduzido; viii) a inexistência de sensibilidade dos perfis metálicos relativamente à humidade ou a atividades biológicas, o que permite que o aço não sofra degradações das suas propriedades resistentes devido a esses fatores; ix) a grande flexibilidade arquitetónica; e x) a capacidade de permitir integrar vários tipos e configurações de materiais de isolamento térmico, contribuindo

para a construção de edifícios com consumos energéticos mais reduzidos (Roque e Santos, 2017).

No entanto, embora este sistema construtivo ofereça variadas vantagens, existem alguns aspetos negativos que deverão ser tidos em conta e sujeitos a estratégias de mitigação. A presença de pontes térmicas originadas pela elevada condutibilidade térmica do aço (cerca de $50 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) (Hyperphysics, 2020) pode originar perdas de calor significativas pela envolvente da construção, aumentando as necessidades de aquecimento. Para além disso, a reduzida inércia térmica frequentemente associada a este tipo de construção pode conduzir a problemas como o sobreaquecimento dos espaços interiores e a flutuações de temperaturas consideráveis (Soares *et al.*, 2017).

Ainda que as características específicas e as diversas vantagens deste sistema construtivo façam com que se trate de uma solução eficaz para aplicação em diversas áreas da construção civil, este sistema é especialmente indicado para a construção de edifícios residenciais de baixa altura e para a reabilitação de edifícios antigos (Futureng, 2020a).

2.2 Métodos de assemblagem da construção em LSF

Os elementos básicos da construção em LSF, sendo pré-fabricados, podem resultar em três diferentes métodos de assemblagem: i) construção por elementos, ii) construção por painéis e iii) construção por módulos (Figura 2.2).

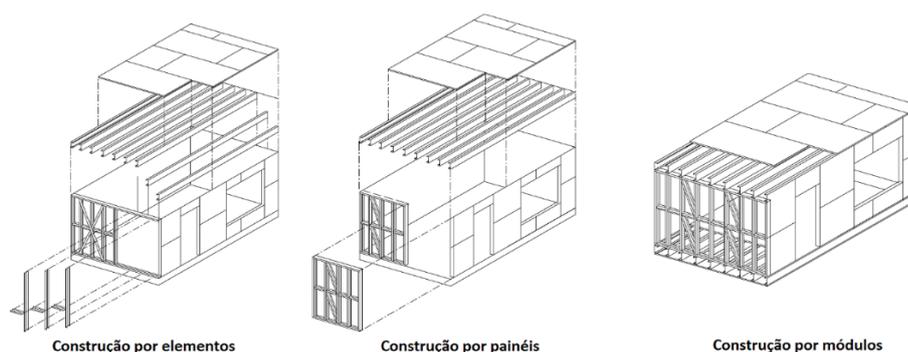


Figura 2.2 – Métodos de assemblagem da construção em LSF (Grubb *et al.*, 2001).

Na construção por elementos, a composição da estrutura é realizada a partir da junção, no local da obra, dos elementos básicos estruturais. Neste método de assemblagem, os perfis de aço são montados em obra de forma a compor os vários componentes da estrutura. Por sua vez, na construção por painéis, conjuntos estruturais completos de paredes, pavimentos e coberturas são produzidos em fábrica sendo, posteriormente, montados em obra. Neste método de

construção para além dos elementos metálicos, também podem ser aplicados aos painéis, em fábrica, outros componentes como o material de isolamento ou os painéis de revestimento. Por fim, na construção por módulos, unidades completas da construção são pré-fabricadas, sendo posteriormente, em local de obra, dispostas de forma a compor a configuração definitiva da construção (Grubb *et al.*, 2001). De forma a conjugar os aspetos positivos de cada um destes métodos, é possível, ainda, adotar métodos de construção híbridos, contemplando a construção conjunta em painéis e modular, ou mesmo uma combinação dos três métodos descritos. No Quadro 2.1 apresentam-se as principais vantagens de cada um dos métodos de montagem da construção em LSF.

Quadro 2.1 – Vantagens de cada um dos métodos de montagem da construção em LSF (Soares *et al.*, 2017).

Construção por elementos
- Tolerâncias de construção e modificações podem ser acomodadas no local de obra
- As técnicas de ligação são relativamente simples
- Os empreiteiros não necessitam das instalações de estaleiro de obra associadas à construção por painéis e por módulos
- Grandes quantidades de elementos estruturais podem transportadas em carregamentos únicos
Construção por painéis
- Elevada velocidade de montagem dos painéis ou das sub-estruturas
- Melhor controlo de qualidade na produção
- Minimização dos custos de laboração no local de obra
- Adequado para automatizações na produção em fábrica
- A aplicação de sistemas de revestimento e de acabamento é mais fácil e rápido com o painel numa posição horizontal
Construção modular
- Custos de construção reduzidos, principalmente quando combinados com uma produção em economia de escala
- Tempo de construção em obra muito reduzido
- Elevada velocidade de montagem dos painéis ou das sub-estruturas
- Aumento da rentabilidade da indústria
- Aumento da produtividade em obra
- Elevada certeza de cumprimento de prazos e de limitações orçamentais
- Reduzidos desperdícios durante o fabrico e em obra
- Maior fiabilidade e qualidade
Construção "híbrida" com painéis e módulos
- Vantagens otimizadas da construção por painéis e por módulos
Construção "híbrida" com elementos, painéis e módulos
- Vantagens semelhantes à construção "híbrida" com painéis e módulos
- Edifícios mais altos e maior flexibilidade no planeamento interno

2.3 Materiais de construção

2.3.1 Tipos de materiais

A construção em LSF é caracterizada por ser um sistema de construção “seco”, no qual os diversos elementos constituintes são pré-fabricados e, posteriormente, montados no local de obra. Neste sistema de construção, três tipos principais de materiais são geralmente utilizados

(Silvestre et al, 2013): i) perfis de aço enformados a frio; ii) painéis de revestimento (placas de OSB - “*Oriented Strand Board*” e de gesso cartonado); e iii) materiais de isolamento (lã de rocha no interior das paredes e lajes, e poliestireno expandido no sistema ETICS).

Adicionalmente, existem outros materiais complementares associados a este sistema construtivo, tais como, os elementos constituintes das ligações, as membranas de estanqueidade ao ar, e as camadas de acabamento.

2.3.2 Perfis de aço enformados a frio

Os perfis de aço enformados a frio são os elementos básicos das estruturas de construções em LSF e são utilizados nas paredes, exteriores e interiores, nas lajes e nas coberturas. A resistência e a rigidez destes elementos dependem, não só da classe do aço e da espessura das chapas, mas também da geometria da secção transversal. Estes perfis podem apresentar diversas secções transversais (Figura 2.3), a maior parte delas identificadas por uma letra (U, C, Z, I,...), sendo comercializados com espessuras das chapas de aço que variam, normalmente, entre 0,45 mm e 6 mm (Soares *et al.*, 2017).

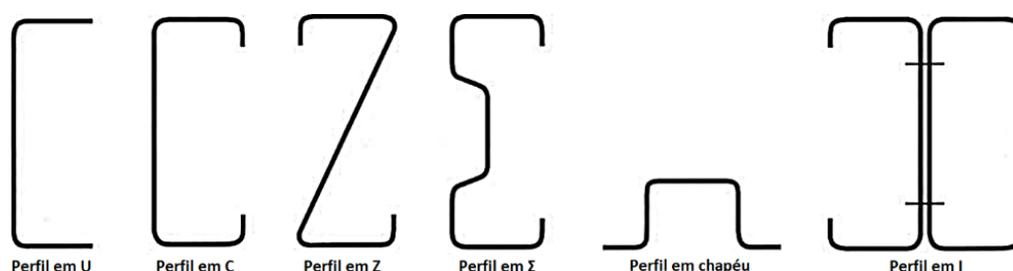


Figura 2.3 – Secções transversais de perfis de aço enformados a frio (LSK, 2005).

O aumento da durabilidade dos perfis enformados a frio das construções em LSF é, frequentemente, alcançado através da galvanização das superfícies destes elementos, de acordo com a norma EN 10326, evitando, desta maneira, eventuais processos de corrosão e de degradação. A regulamentação dos elementos estruturais enformados a frio e das chapas perfiladas é realizada pelo documento normativo EN 1993-1-3 (Eurocódigo 3: Projeto de estruturas de aço; Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios; Subparte 3: Elementos estruturais enformados a frio e chapas perfiladas) (Simões, 2005).

2.3.3 Painéis de revestimento

As placas de OSB e de gesso cartonado constituem-se como os elementos de revestimento mais utilizados no sistema construtivo em LSF (Figura 2.4). As placas de OSB, utilizadas em

paredes, pavimentos e coberturas, são fabricadas a partir de lâminas de madeira dispostas segundo camadas com direções perpendiculares e unidas através da adição de colas, criando um painel impermeável e com uma significativa resistência. Para além disso, tendo em conta a resistência oferecida, os painéis OSB são leves, e fáceis de manusear e de instalar (APA, 2020). Para além de funcionarem como placas de revestimento, as placas de OSB podem apresentar também um papel estrutural, contribuindo para a resistência da construção a cargas atuantes na direção perpendicular ao seu plano, como por exemplo, o vento (Santos, 2017). Por sua vez, as placas de gesso cartonado são produzidas a partir de gesso, água e aditivos que conferem propriedades específicas ao painel em função da sua utilização. Neste tipo de construção, as placas de gesso cartonado são utilizadas, frequentemente, como revestimento interior de paredes e tetos (Futureng, 2020).



Figura 2.4 – Painéis de revestimento: a) placas OSB; b) placas de gesso cartonado (Futureng, 2020b).

2.3.4 Elementos de fixação

Nas construções em LSF, o processo de fixação dos vários elementos construtivos constitui-se como um dos fatores de maior importância, na medida em que a quantidade de trabalho implicada na realização das ligações pode representar um contributo significativo para o custo global da construção. Desta maneira, torna-se fundamental melhorar a eficiência do processo de fixação deste sistema construtivo, podendo isso ser feito, tipicamente, através do desenvolvimento de detalhes e de métodos de fixação mais eficientes. A escolha do método de fixação para uma determinada construção em LSF depende de diversos fatores, tais como, as condições de carregamento, a resistência exigida para a ligação, a configuração do material, os elementos de ligação e as ferramentas disponíveis, o local de montagem (em fábrica ou no local de obra), o custo, a experiência do construtor, os requisitos de durabilidade e as imposições normativas.

O método de fixação utilizado com maior frequência é baseado na utilização de parafusos auto-perfurantes (Figura 2.5). De forma a aumentar a capacidade resistente da ligação com parafusos é frequente a utilização de anilhas, podendo ainda, adicionalmente, aplicar-se anilhas de borracha com o objetivo de aumentar a estanqueidade no local da ligação. Para além disso, os parafusos auto-perfurantes são, normalmente, fabricados em aço-carbono ou em aço inoxidável com tratamento térmico de maneira a resistir às elevadas temperaturas geradas por fricção durante o processo de perfuração.

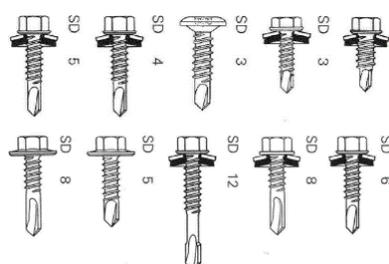


Figura 2.5 – Parafusos auto-perfurantes (Santos *et al.*, 2012).

Outros métodos de fixação, utilizando pregos, rebites, soldaduras, cavilhas, cliques e colagens, são também aplicados no sistema construtivo em LSF. Na Figura 2.6 encontram-se ilustrados alguns métodos utilizados na ligação perfil-perfil e painel-perfil (LSK, 2005).

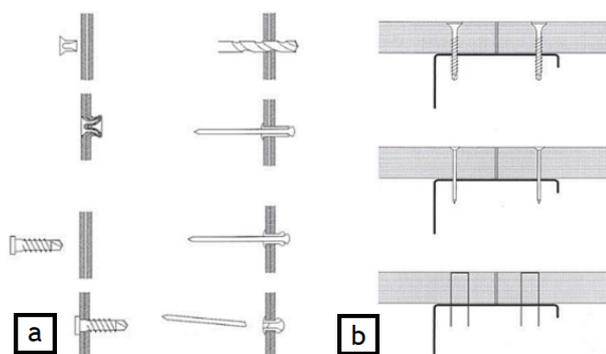


Figura 2.6 – Métodos de ligação: a) perfil-perfil; b) painel-perfil (LSK, 2005).

2.3.5 Materiais de isolamento térmico

Os materiais de isolamento térmico utilizados nas construções em LSF são, na grande maioria das vezes, a lã de rocha e o poliestireno expandido (EPS). A lã de rocha trata-se de um material de isolamento inorgânico e fibroso com um coeficiente de condutibilidade térmica que varia entre 33 e 40 mW/(m·°C) (Schiavoni *et al.*, 2016). Este material é, geralmente, aplicado entre os perfis de aço dos elementos construtivos, funcionando não só como isolamento térmico, mas

também como isolamento acústico e como barreira resistente ao fogo. Por sua vez, o EPS é um material que possui um coeficiente de condutibilidade térmica dentro do intervalo de 30 a 40 mW/(m·K), produzido a partir de pequenas esferas de poliestireno que sofrem um processo de aumento de volume através da adição de um agente de expansão, sendo utilizado, na construção em LSF, integrado no sistema ETICS (Jelle, 2011). Este sistema de revestimento, sendo colocado na superfície exterior da construção e de forma contínua, apresenta a vantagem de permitir minimizar as pontes térmicas originadas pelos perfis de aço da estrutura. Para além disso, com o objetivo de reduzir as perdas de calor pelas pontes térmicas originadas pelos perfis de aço, por vezes, aplicam-se tiras de corte térmico entre os perfis e os painéis de revestimento. As tiras de corte térmico para aplicação no sistema construtivo em LSF podem ser constituídas por diversos materiais, tais como, a borracha reciclada, o poliestireno extrudido e o aerogel (Santos *et al.*, 2019) (Figura 2.7).



Figura 2.7 – Materiais de isolamento térmico: a) lâ de rocha – interior das paredes; b) poliestireno expandido – exterior das paredes; c) borracha reciclada – tiras de corte térmico (Pereira e Santos, 2019).

2.3.6 Membranas de estanqueidade ao ar

A adequada utilização de membranas de estanqueidade ao ar permite, ao diminuir as infiltrações de ar, controlar as perdas de calor pela envolvente do edifício. Para além disso, uma outra vantagem proporcionada pela adequada utilização destas membranas é a redução do teor de humidade no interior dos elementos construtivos, fazendo com que o risco de ocorrência de condensações intersticiais seja minimizado.

Uma correta aplicação destas barreiras numa construção em LSF implica que existam duas camadas de membranas ao longo da envolvente exterior. Uma camada deve ser aplicada no lado interno do revestimento exterior, sempre que não exista uma membrana impermeável, ou existindo, não seja capaz de evitar as infiltrações de ar. Esta camada, no entanto, deve ser

permeável ao vapor de água de forma a permitir a saída de possível humidade existente no interior dos elementos construtivos, evitando a sua acumulação (Figura 2.8). Outra camada deve ser aplicada na face interior da envolvente, com o intuito de evitar a fuga do ar quente presente no interior do edifício. Esta barreira deve apresentar também a capacidade de impedir a passagem de vapor de água para o interior dos elementos construtivos, evitando, assim, eventuais condensações intersticiais (Soares *et al.*, 2017).



Figura 2.8 – Membrana de estanqueidade ao ar (Soares *et al.*, 2017).

2.3.7 Camadas de acabamento

As soluções disponíveis relativamente a acabamentos para a construção em LSF são semelhantes às soluções utilizadas, por exemplo, em construções tradicionais de betão armado com alvenaria de tijolo cerâmico (Figura 2.9). Nas paredes, os materiais de acabamento mais utilizados são as placas de gesso cartonado nas superfícies interiores, e o sistema ETICS nas superfícies exteriores. As placas de gesso cartonado são também frequentemente utilizadas nos revestimentos de tetos. Nos pavimentos, acabamentos comuns como mosaicos cerâmicos, soalhos e alcatifas podem ser aplicados. Em relação às coberturas, de acordo com o seu tipo e geometria, soluções em telha, com painéis metálicos ou outras também utilizadas em sistemas de construção tradicionais, podem ser adotadas (Soares *et al.*, 2017).



Figura 2.9 – Camada de acabamento em ETICS (Perfisa, 2020).

3 DESEMPENHO TÉRMICO DO SISTEMA CONSTRUTIVO EM LSF

3.1 Enquadramento

O desempenho térmico das construções em LSF depende de diversos fatores que devem ser avaliados durante as fases de conceção e de projeto do edifício, de forma a que as soluções mais adequadas e que conduzam à otimização do seu comportamento térmico sejam implementadas. Embora as características deste sistema construtivo possam potenciar o aparecimento de vários problemas que afetam o seu desempenho térmico, existem inúmeras estratégias que podem ser utilizadas com a finalidade de melhorar o seu desempenho térmico. A correta aplicação de materiais de isolamento térmico e a implementação de estratégias apropriadas para o tratamento das pontes térmicas e para o aumento da inércia térmica, em conjunto com estratégias de ventilação adequadas e técnicas solares passivas eficazes, permitem melhorar de forma significativa o desempenho térmico e, conseqüentemente, reduzir as necessidades energéticas para alcançar o conforto térmico desejado.

Devido à sua estrutura composta por elementos de aço, as construções em LSF podem apresentar pontes térmicas relevantes que influenciam negativamente o seu desempenho térmico. A elevada condutibilidade térmica do aço (cerca de $50 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) propicia o aumento dos fluxos de calor nas zonas da envolvente atravessadas pelos elementos metálicos da estrutura e pode, conseqüentemente, ser responsável pelo aumento das necessidades energéticas destinadas a manter o conforto térmico do ambiente interior. Como tal, a aplicação de estratégias de tratamento das pontes térmicas de forma a reduzir as trocas de calor nestas zonas mais sensíveis da envolvente é fundamental para melhorar o desempenho térmico e energético das construções em LSF.

Outro aspeto negativo frequentemente associado ao sistema construtivo LSF é a sua baixa inércia térmica. O reduzido peso associado a este tipo de construções relaciona-se muitas vezes com níveis de inércia térmica baixos que podem, em consequência das alterações de temperatura exteriores, provocar oscilações da temperatura do ambiente interior com amplitudes bastante elevadas. De maneira a contrariar esse efeito, é muitas vezes necessário recorrer à implementação de estratégias que têm como finalidade aumentar a inércia térmica deste tipo de construções e, desta maneira, reduzir a sensibilidade da construção face às variações térmicas ocorridas no exterior.

Um dos elementos mais importantes para a definição do desempenho térmico das construções em LSF são os materiais de isolamento térmico. A adequada aplicação de materiais de isolamento térmico possibilita aumentar a resistência térmica da envolvente e trata-se de uma possível solução para proceder ao tratamento das pontes térmicas e ao aumento da inércia térmica das construções em LSF. Para além disso, dependendo da localização dos materiais de isolamento térmico nos elementos construtivos existem não apenas diferentes tipos de tratamento relativamente às pontes térmicas e à inércia térmica, como também estão associados distintos valores do coeficiente de transmissão térmica U das envolventes, pelo que este aspeto apresenta uma grande importância para a definição do desempenho térmico global das construções em LSF.

3.2 Coeficiente de transmissão térmica dos elementos da construção em LSF

Na avaliação do desempenho térmico de um elemento construtivo, o parâmetro calculado e analisado é o coeficiente de transmissão térmica U . Este parâmetro define o fluxo de calor que atravessa, perpendicularmente e por unidade de área, um determinado elemento construtivo sujeito a um gradiente de temperatura de 1 K, e é expresso em $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. O coeficiente de condutibilidade térmica U , em elementos da construção em LSF, pode ser determinado, por exemplo, através de métodos numéricos, modelando os elementos utilizando programas de cálculo. Nas zonas em que o elemento construtivo é composto por camadas de material dispostas paralelamente e o fluxo de calor é unidimensional, o parâmetro U pode ser determinado através do inverso da resistência térmica global R , através da expressão:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} \quad (1)$$

em que, R_{si} [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$] é a resistência térmica superficial interior, R_j [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$] é a resistência térmica da camada j do elemento construtivo, e R_{se} [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$] é a resistência térmica superficial exterior. As resistências térmicas superficiais têm em consideração os efeitos da convexão e radiação nas superfícies interior e exterior, respetivamente. A resistência térmica de cada camada constituinte do elemento construtivo é dada pelo inverso da sua condutância térmica K_p [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$], que pode ser determinada a partir da expressão:

$$K_p = \frac{\lambda}{e} \quad (2)$$

onde, λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] é o coeficiente de condutibilidade térmica do material e e [m] a sua espessura. Posto isto, o fluxo de calor Q [W] que atravessa, perpendicularmente, o elemento

construtivo, em regime permanente, é proporcional ao coeficiente de transmissão térmica U , e pode ser calculado por:

$$Q = UA (T_i - T_e) \quad (3)$$

em que, U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] é o coeficiente de transmissão térmica, A [m^2] é a área do elemento, perpendicular ao fluxo de calor, T_i [K] é a temperatura do ambiente interior e T_e [K] é a temperatura do ambiente exterior.

A implementação na construção de materiais com baixa condutibilidade térmica é a forma mais direta de obter soluções construtivas com resistências térmicas mais elevadas. Neste contexto, no sistema construtivo em LSF, os materiais de isolamento térmico aplicados na construção são o elemento com maior influência para a obtenção de resistências térmicas superiores e, como tal, tratam-se de um fator com um significativo peso no desempenho térmico global da construção. Desta maneira, a utilização de novos materiais de isolamento de alto desempenho pode ser, assim, uma solução importante para a construção em LSF no que respeita à melhoria do desempenho térmico. Uma adequada aplicação de materiais de isolamento térmico de alto desempenho como os aerogéis ou os painéis de isolamento a vácuo (VIP), que podem atingir valores do coeficiente de condutibilidade térmica de $13 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ e de $4 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, respetivamente (Jelle, 2011), pode permitir um melhoramento substancial do desempenho térmico da construção. Para além disso, face aos coeficientes de condutibilidade térmica bastante baixos, estes materiais podem apresentar espessuras muito menores comparativamente com os materiais de isolamento tradicionais, para obter o mesmo nível de resistência térmica, permitindo, assim, obter soluções construtivas com menor espessura e, conseqüentemente, aumentar a área útil da construção.

3.3 Pontes térmicas

Um dos poucos pontos negativos associados à construção em LSF está relacionado com a potencial existência de pontes térmicas significativas devido à elevada condutibilidade térmica do aço. As pontes térmicas são caminhos preferenciais para a ocorrência de trocas de calor através da envolvente e são originadas pela existência de determinadas zonas com menor resistência térmica. O aumento do fluxo de calor pelas pontes térmicas pode influenciar substancialmente o desempenho térmico da construção e, conseqüentemente, implicar o aumento das necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, podendo ser também um fator condicionante da eficiência energética (Santos, 2017). A influência das pontes térmicas apresenta uma importância considerável em edifícios com envolventes fortemente isoladas termicamente, uma vez que, nessas construções, a influência das perdas de calor pelas

pontes térmicas em relação às perdas de calor totais é superior comparativamente com edifícios que apresentam níveis de isolamento térmico menores (Erhorn-Kluttig e Erhorn, 2009).

De acordo com Santos *et al.* (2012) podem ser considerados três principais tipos de pontes térmicas: i) pontes térmicas geométricas ao nível dos cantos e junções, tais como, as junções de portas e janelas, as ligações parede-parede e parede-laje; ii) pontes térmicas isoladas, provocadas, por exemplo, pela perfuração do sistema ETICS por parafusos de aço; e iii) pontes térmicas repetitivas, nas zonas da envolvente atravessadas pelos perfis metálicos da estrutura.

Como forma de contrariar o efeito negativo das pontes térmicas nas construções em LSF, existem várias estratégias de mitigação que podem ser aplicadas. Parte dessas estratégias de mitigação são procedimentos construtivos de caráter geral e comuns a outros tipos de construções, tais como: i) a conceção de fachadas com geometria simples; ii) a não interrupção das camadas de isolamento térmico nos pontos singulares da construção (p.e. arestas, saliências, obstáculos); e iii) a colocação de uma camada contínua de isolamento térmico pelo exterior (Soares *et al.*, 2017).

Para além das estratégias referidas, existem outras de aplicação específica para o sistema construtivo em LSF, baseadas na manipulação do comportamento térmico dos elementos metálicos da construção, das quais se destacam: i) a diminuição da espessura dos perfis metálicos; ii) a aplicação de perfis metálicos com perfurações longitudinais, com o objetivo de aumentar o trajeto percorrido pelo calor e, portanto, reduzir o fluxo térmico (Figura 3.1 a); iii) a utilização de materiais de baixa condutibilidade térmica (p.e. tiras de borracha) na zona de contato entre os perfis metálicos e os painéis de revestimento (Figura 3.1 b); e iv) a alteração da forma dos perfis metálicos na zona dos banzos, de maneira a reduzir a área de contato com os painéis de revestimento (Figura 3.1 c) (Pereira e Santos, 2019).

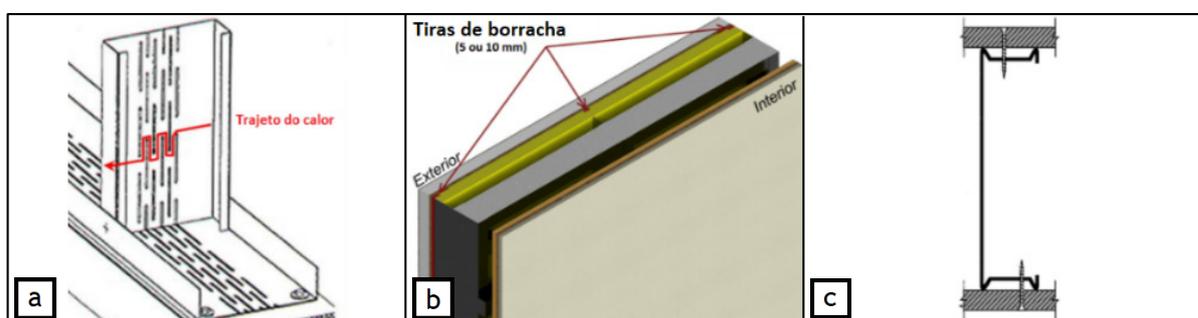


Figura 3.1 – Estratégias de mitigação de pontes térmicas: a) perfis metálicos com perfurações longitudinais; b) bandas de borracha; c) perfis metálicos de banzos modificados (adaptada de Pereira e Santos, 2019).

3.4 Inércia térmica

A inércia térmica expressa a capacidade de um material armazenar e libertar calor quando sujeito a ciclos de variação de temperatura. Em edifícios, esta propriedade ganha importância na medida em que influencia a resposta das construções face às flutuações diárias da temperatura exterior. Construções com inércia térmica mais elevada apresentam uma menor sensibilidade às variações da temperatura exterior, o que se traduz na redução da amplitude das oscilações de temperatura verificadas no ambiente interior. Esta capacidade é proporcional à massa de material existente nos elementos construtivos que consegue armazenar e, posteriormente, libertar gradualmente energia térmica, contribuindo, desta maneira, para o aumento da estabilidade de temperaturas no interior das construções. Os edifícios em LSF, devido ao seu baixo peso, apresentam, geralmente, uma reduzida inércia térmica sendo mais suscetíveis, portanto, à ocorrência de elevadas flutuações da temperatura interior. A baixa inércia térmica associada a este sistema construtivo poderá ser prejudicial à manutenção do conforto térmico, uma vez que poderá, por exemplo, originar problemas de sobreaquecimento durante a estação de arrefecimento. No entanto, por outro lado, a baixa inércia térmica da construção possibilita o fácil e rápido aquecimento ou arrefecimento do ambiente interior quando se recorre a sistemas AVAC para alcançar o nível de conforto térmico pretendido (Silvestre *et al.*, 2013).

Embora a baixa inércia térmica esteja, frequentemente, associada à construção em aço leve, existe um conjunto de estratégias que podem ser adotadas com a finalidade de aumentar a inércia térmica. Uma delas é a aplicação de isolamento térmico pelo exterior (p.e. sistema ETICS), de forma a aumentar a massa térmica em contato direto com o ambiente interior. O isolamento térmico pelo exterior permite que os materiais constituintes dos elementos construtivos armazenem maiores quantidades de energia térmica e que, quando a temperatura exterior baixa, possam ceder parte dessa energia para o ambiente interior. Outra estratégia está relacionada com o aumento da massa térmica dos elementos construtivos utilizando, por exemplo, uma camada de betão nos pavimentos, ou recorrendo à colocação de materiais de elevada massa, como pedras, em locais específicos da construção (Figura 3.1 a). Uma terceira estratégia baseia-se no aproveitamento da elevada inércia térmica do solo. A estabilidade de temperaturas verificada no solo ao longo do ano pode ser aproveitada instalando no solo um permutador de calor terra-ar e fazendo com que o ar exterior passe por um conjunto de tubos enterrados para depois ser conduzido para o interior do edifício (Figura 3.2 b). Por último, a utilização de *Phase Change Materials* (PCMs) é outra possível estratégia para o aumento da inércia térmica (Figura 3.3 c). Os PCMs são materiais que proporcionam uma elevada capacidade de armazenar e libertar energia térmica durante a transição de fase (calor latente), podendo ser aplicados na envolvente do edifício na forma de painéis (Soares *et al.*, 2013).

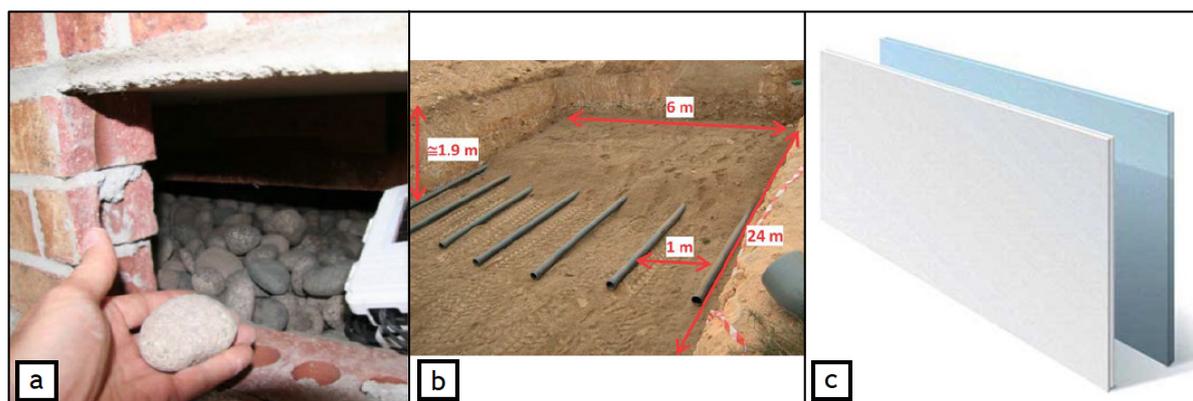


Figura 3.2 – Estratégias para aumentar a inércia térmica: a) implementação de uma caixa de pedras; b) aproveitamento da inércia térmica do solo; c) utilização de PCMs (adaptada de Pereira e Santos, 2019).

3.5 Eficiência dos materiais de isolamento térmico em função da sua posição

3.5.1 Classificação dos elementos construtivos

De acordo com a localização do isolamento térmico nos elementos construtivos, consideram-se, tipicamente, três tipos de construção em LSF: i) construção do tipo fria; ii) construção do tipo híbrida; e iii) construção do tipo quente. A construção do tipo fria é caracterizada por apresentar o material de isolamento térmico somente no interior das paredes, entre os perfis metálicos. Neste caso, a camada de isolamento térmico é interrompida nos espaços ocupados pelos perfis metálicos fazendo com que as pontes térmicas através do aço ganhem relevância. Consequentemente, as perdas de calor nessas zonas aumentam e provocam uma redução da temperatura dos perfis metálicos, elevando, assim, o risco de ocorrência de condensações intersticiais. Quando o material de isolamento térmico é aplicado de forma distribuída entre o interior das paredes e a superfície exterior da envolvente, a construção é classificada como híbrida. A colocação de parte do material de isolamento térmico na face exterior da envolvente permite reduzir as perdas de calor pelas pontes térmicas originadas pelo aço, diminuindo também o risco de ocorrência de condensações intersticiais. Por último, na construção do tipo quente, todo o material de isolamento térmico é colocado na superfície exterior da envolvente. Embora este tipo de construção esteja associado a paredes de maior espessura, o desempenho térmico alcançado é superior comparativamente com a construção fria e híbrida (Roque e Santos, 2017).

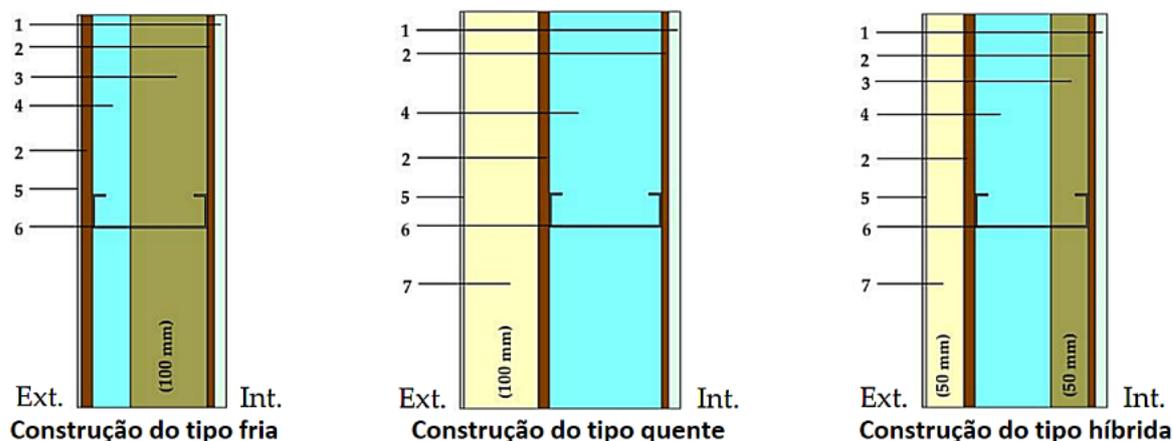


Figura 3.3 – Tipos de construção em LSF consoante o posicionamento do isolamento térmico. Materiais: 1 – gesso cartonado; 2 – OSB; 3 – lã de rocha; 4 – ar; 5 – acabamento em ETICS; 6 – LSF; 7 – EPS (adaptada de Roque e Santos, 2017).

3.5.2 Desempenho térmico em função do tipo de construção

O modo como os materiais de isolamento térmico se encontram dispostos nos elementos construtivos das construções em LSF influencia significativamente o comportamento térmico global do edifício. A cada tipo de construção (quente, híbrido ou frio) corresponde não só distintos tipos de tratamento em relação às pontes térmicas e à inércia térmica, como também estão associados diferentes valores do coeficiente de transmissão térmica U dos elementos construtivos, pelo que este aspeto apresenta uma grande importância para a definição do desempenho térmico global da construção. Atsonios *et al.* (2018) realizaram um estudo onde analisaram o efeito do posicionamento dos materiais de isolamento térmico na mitigação das pontes térmicas originadas pelos perfis de aço nas construções em LSF. De acordo com os resultados obtidos verifica-se que as pontes térmicas apresentam uma maior relevância na construção do tipo fria, o que pode ser explicado pela colocação dos materiais de isolamento térmico apenas no interior das paredes e pela sua interrupção nos espaços ocupados pelos perfis metálicos, fazendo com que o fluxo de calor nessas zonas de interrupção do isolamento seja superior. Contrariamente, na construção do tipo quente, dada a colocação dos materiais de isolamento térmico pelo exterior e de forma contínua, o tratamento das pontes térmicas originadas pelos perfis metálicos demonstra-se mais eficaz. A implementação de uma construção do tipo quente, para além de possibilitar menores perdas de calor pelas pontes térmicas e de, assim, contribuir para o conforto térmico do ambiente interior, também proporciona temperaturas mais elevadas junto dos perfis metálicos e da superfície interior, reduzindo, assim, o risco de ocorrência de condensações (Figura 3.4).

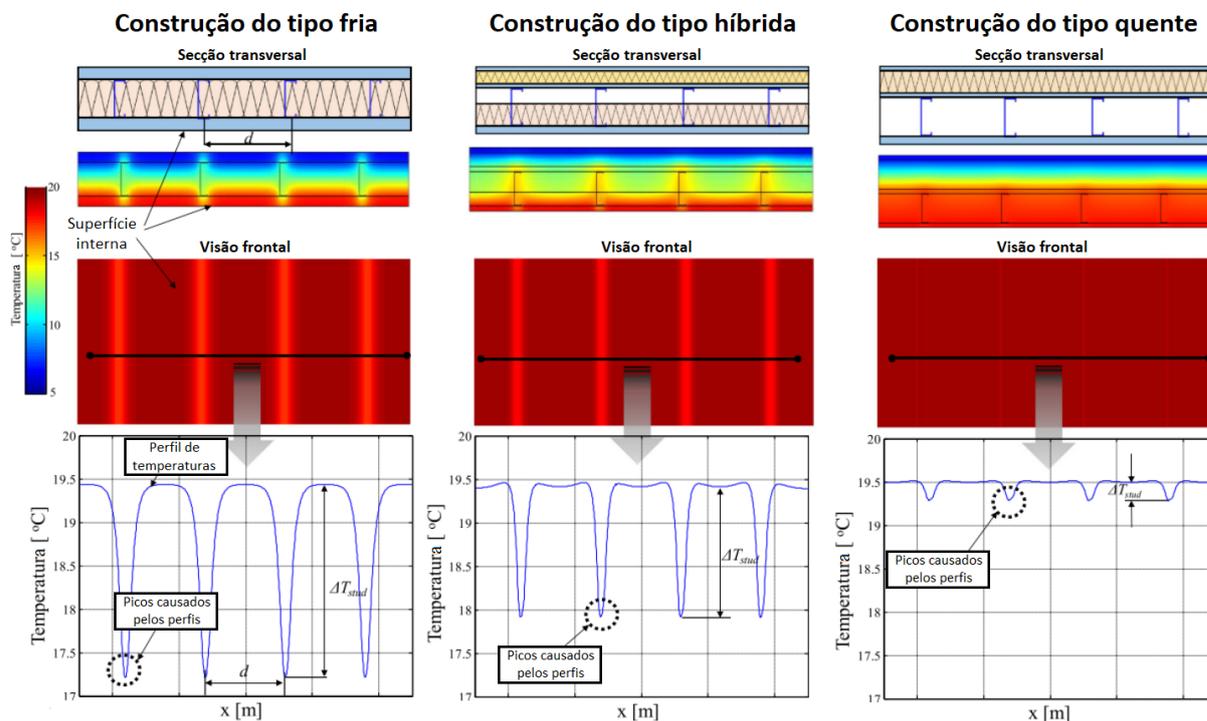


Figura 3.4 – Efeito das pontes térmicas em função do tipo de construção (adaptada de Atsonios *et al.*, 2018).

Num estudo realizado por Santos *et al.* (2014), analisou-se o desempenho térmico de três tipos de parede representativas dos três tipos de construção, considerando a mesma espessura de isolamento térmico (120 mm) (Figura 3.5).

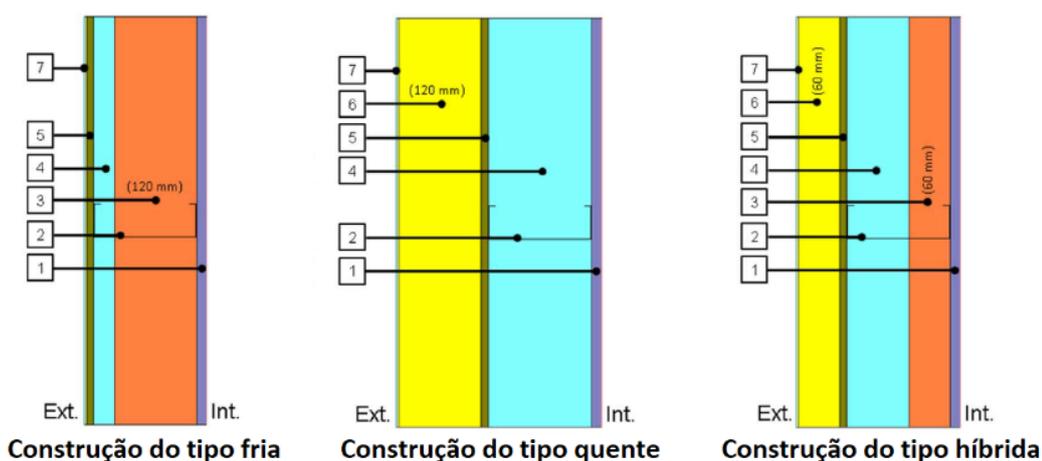


Figura 3.5 – Classificação das construções em LSF em função da posição dos materiais de isolamento térmico. Materiais: 1 – gesso cartonado; 2 – OSB; 3 – lâ de rocha; 4 – ar; 5 – acabamento em ETICS; 6 – LSF; 7 – EPS (adaptado de Santos *et al.*, 2014).

A distribuição de temperaturas na secção transversal das paredes e os valores do coeficiente de transmissão térmica obtidos (Figura 3.6) demonstram que a construção do tipo fria apresenta o pior desempenho. Neste tipo de construção verifica-se que o coeficiente de transmissão térmica é mais elevado, e a gama de temperaturas registadas ao longo da parede (inferiores às registadas nos outros dois tipos de construção) indicam que o risco de ocorrência de condensações intersticiais e superficiais é superior. Contrariamente, na construção do tipo quente verifica-se o melhor desempenho, apresentando não só o coeficiente de transmissão térmica mais baixo, como também valores de temperatura mais elevados ao longo da secção transversal da parede, minimizando, como tal, o risco de ocorrência de condensações.

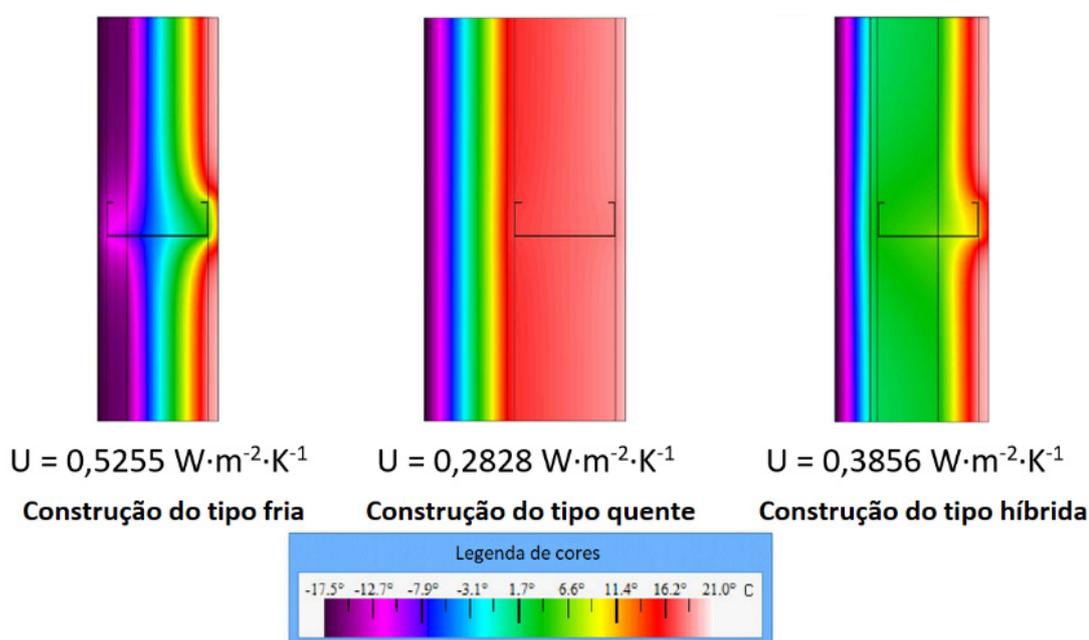


Figura 3.6 – Distribuição de temperaturas nas secções transversais das paredes (adaptada de Santos *et al.*, 2014).

Roque e Santos (2017) realizaram um estudo onde compararam os valores do coeficiente de transmissão térmica dos três tipos de construção e os valores impostos pelo Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) para as três zonas climáticas (I1, I2 e I3), considerando seis espessuras de isolamento térmico (150 mm, 125 mm, 100 mm, 75 mm, 50 mm e 25 mm). Analisando os resultados obtidos, verifica-se, novamente, que a construção do tipo fria apresenta o pior comportamento térmico. Somente para espessuras de isolamento térmico de 150 mm e de 125 mm é que este tipo de construção é capaz de respeitar os limites máximos do coeficiente de transmissão térmica impostos para a zona climática menos exigente (I1). De maneira oposta, a construção do tipo quente assegura o cumprimento do valor de U imposto pelo REH para a zona climática mais exigente (I3) com espessuras de isolamento

térmico de pelo menos 100 mm. De referir ainda que, para esse mesmo tipo de construção, um isolamento térmico de pelo menos 50 mm garante o valor de U necessário para cumprir as imposições regulamentares para a zona climática I1. Por sua vez, a construção do tipo híbrida demonstra desempenhos intermédios comparativamente com os outros dois tipos de construção, verificando-se uma ligeira aproximação ao comportamento apresentado pela construção quente (Figura 3.7).

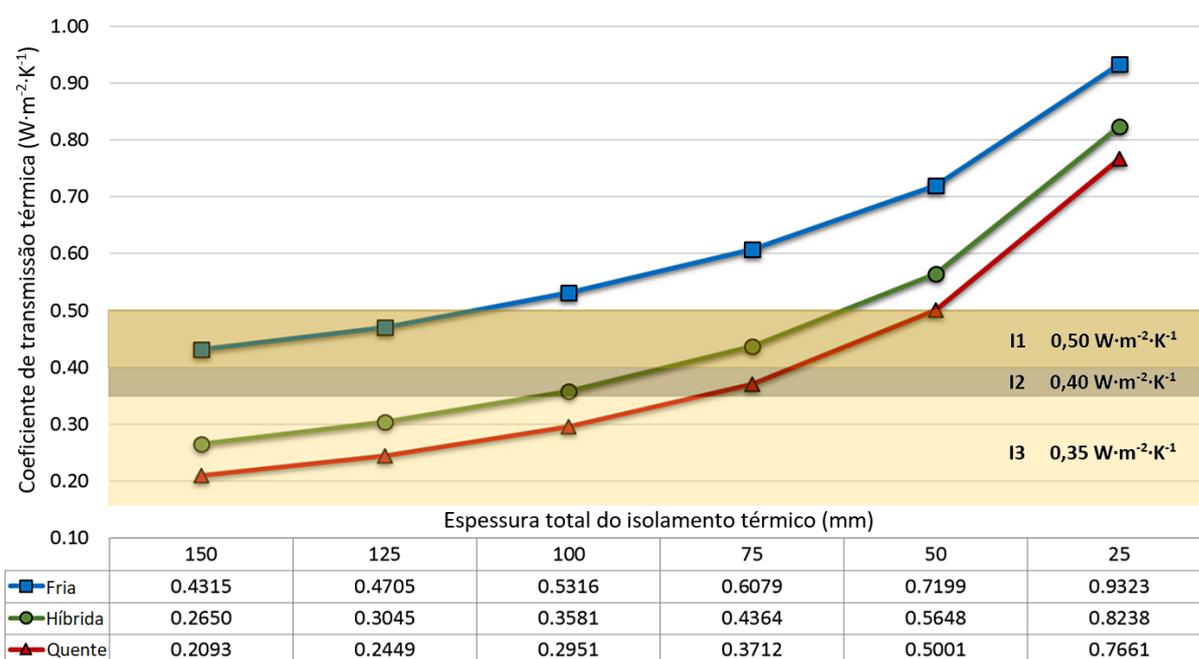


Figura 3.7 – Valores dos coeficientes de transmissão térmica obtidos para os três tipos de construção e comparação com os limites impostos pelo REH, para as três zonas climáticas I1, I2 e I3 (adaptada de Roque e Santos, 2017).

4 MATERIAIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO

4.1 Enquadramento

A implementação de um setor da construção mais sustentável depende significativamente da seleção dos materiais de isolamento térmico aplicados nos edifícios. O desempenho térmico global das construções e, conseqüentemente, as necessidades energéticas para alcançar o conforto térmico dos espaços interiores é definido, em grande parte, pelos materiais de isolamento térmico aplicados na envolvente das construções. Embora o desempenho térmico seja, geralmente, a propriedade preferencial e decisiva para a seleção do material de isolamento a aplicar numa determinada construção, este não deve ser o único parâmetro a ter em consideração. Cada vez mais, no setor da construção, a escolha do material de isolamento térmico é baseada numa análise global das suas propriedades, onde se considera, para além do desempenho térmico, também o desempenho acústico, o comportamento ao fogo, a permeabilidade ao vapor de água e os impactos no meio ambiente e na saúde humana. Neste contexto, o surgimento de novos materiais de isolamento que conciliem desempenhos favoráveis nesses diferentes parâmetros e que possam ser produzidos e comercializados com custos competitivos pode ser uma importante solução para a obtenção de edifícios com um desempenho térmico melhorado, mais eficientes energeticamente e com um nível de sustentabilidade superior (Schiavoni *et al.*, 2016).

No presente capítulo, numa primeira parte, apresentam-se a classificação e as formas de caracterização dos materiais de isolamento, tendo em conta o desempenho térmico, o desempenho acústico, os impactos ambientais, o comportamento ao fogo e a permeabilidade ao vapor de água. Numa segunda parte, realizam-se a identificação e a caracterização de duas soluções de isolamento convencionais (lã de rocha e poliestireno expandido), duas soluções de isolamento alternativas (fibra de celulose e lã de ovelha), e duas soluções de isolamento inovadoras (aerogel e painéis de isolamento a vácuo), referindo-se também as principais vantagens e desvantagens de cada um. Para além disso, no final deste capítulo apresenta-se um quadro resumo onde estão contemplados os valores das principais propriedades de um conjunto de materiais de isolamento térmico.

4.2 Classificação

Os materiais de isolamento térmico podem ser classificados de acordo com a sua função, forma e composição (Aditya *et al.*, 2017).

Atendendo à função dos materiais de isolamento térmico em relação à manipulação da transferência de calor, estes podem ser inseridos em duas categorias: isolamentos de massa e isolamentos refletivos. Os isolamentos de massa são, geralmente, o tipo de materiais de isolamento mais utilizado, sendo caracterizados por apresentarem a capacidade de reduzir o fluxo de calor por condução. A eficácia dos isolamentos de massa é altamente dependente da espessura e da massa do material, na medida em que com o aumento da espessura e da massa verifica-se um aumento proporcional do desempenho térmico. Para além disso, a frequente presença, em grande quantidade, de pequenas cavidades de ar fechadas neste tipo de materiais reforça a redução do fluxo de calor por condução, atuando como uma barreira à passagem do calor. Por sua vez, os isolamentos refletivos são materiais que impedem a transferência de calor através da reflexão da radiação térmica que neles incide. Esta capacidade é alcançada devido à existência neste tipo de isolamentos de pelo menos uma superfície refletiva, isto é, uma superfície que apresenta baixa emissividade e que, portanto, tem a capacidade de diminuir a quantidade de energia absorvida por radiação.

De acordo com a forma, geralmente três principais tipos de materiais de isolamento podem ser considerados: espumas projetáveis, mantas e placas rígidas. A escolha da forma do material de isolamento mais adequada para determinada aplicação depende de vários fatores, tais como, o tipo de construção, o plano de reabilitação ou os requisitos impostos pela legislação em vigor.



Figura 4.1 – Classificação dos materiais de isolamento térmico de acordo com a forma: a) espumas projetáveis; b) mantas; c) placas rígidas (Reichel Insulation, 2020; Green Building Advisor, 2020a; Forte EPS Solutions, 2020).

Por fim, a classificação dos materiais de isolamento térmico com base na sua composição é, essencialmente, realizada tendo em consideração a sua estrutura química e física. Neste contexto, Papadopoulos (2005) organizou uma classificação dos materiais de isolamento térmico consoante a sua composição, tendo considerado quatro principais categorias: materiais inorgânicos, orgânicos, combinados e de nova tecnologia. A classificação de vários materiais de isolamento, segundo a sua composição, proposta por este autor, encontra-se apresentada na Figura 4.2.

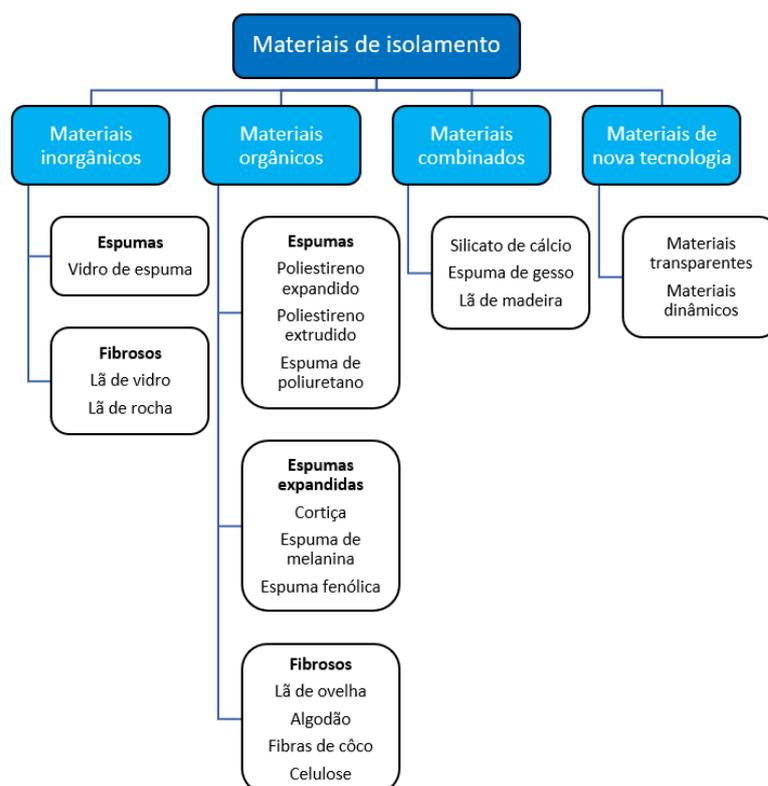


Figura 4.2 – Classificação dos materiais de isolamento térmico de acordo com a sua composição (adaptada de Papadopoulos, 2005).

4.3 Caracterização dos materiais de isolamento

4.3.1 Caracterização térmica

A aplicação de materiais de isolamento térmico na envolvente dos edifícios tem como principal função reduzir o fluxo de calor através das envolventes das construções. Para concretizar esse objetivo de forma eficaz, este tipo de materiais deve apresentar uma elevada resistência térmica de forma a minimizar a transferência de calor e permitir atingir determinados níveis de conforto para os utilizadores do edifício. Em regime permanente, a principal propriedade que caracteriza termicamente um material de isolamento térmico é o coeficiente de condutibilidade térmica (λ). O coeficiente de condutibilidade térmica define o fluxo de calor que atravessa, perpendicularmente e por unidade de área, 1 metro de espessura de um material homogêneo, quando sujeito a um gradiente de temperatura igual a 1 K, e é expresso em $W/(m \cdot K)$. O valor global deste parâmetro depende de quatro fatores de contribuição associados aos diferentes processos de transferência de calor, e a influência de cada fator varia em função das características físicas e químicas de cada material. Posto isto, os quatro fatores de contribuição para a condutibilidade térmica de um material correspondem à transferência de calor por

condução pelo meio sólido (λ_s), por condução pelo meio gasoso (λ_g), por radiação (λ_r) e por convecção (λ_c), de onde resulta a seguinte expressão:

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r + \lambda_c \quad (4)$$

Para além disso, o calor transferido, por unidade de tempo, através de um material homogéneo é proporcional à área de transferência perpendicular ao fluxo de calor e ao gradiente de temperaturas, sendo a constante de proporcionalidade definida pelo coeficiente de condutibilidade térmica. A lei fundamental que descreve este fenómeno denomina-se Lei de Fourier e é definida por:

$$Q = -\lambda \times A \times \frac{d\theta}{dx} \quad (5)$$

onde, Q [W] é o fluxo de calor, λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] é o coeficiente condutibilidade térmica, A [m^2] é a área do elemento perpendicular ao fluxo de calor, e $d\theta/dx$ [K/m] é o gradiente de temperaturas.

Por sua vez, em regime variável, a difusibilidade térmica é o parâmetro principal que caracteriza termicamente um material de isolamento térmico. A difusibilidade térmica é determinada através do quociente entre a condutibilidade térmica (λ) e o produto da densidade (ρ) com o calor específico (c), e define a capacidade do material em armazenar energia, sendo expressa em m^2/s . As normas mais utilizadas internacionalmente para a avaliação dos parâmetros relacionados com a caracterização térmica dos materiais de isolamento encontram-se apresentadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Normas para avaliação dos parâmetros relacionados com a caracterização térmica dos materiais de isolamento.

Parâmetro	Unidade de medição S.I.	Norma	Nota
Condutibilidade térmica	W/(m·K)	EN 12664 28	Resistência térmica baixa
		EN 12667	Resistência térmica alta
		EN 12939	Materiais espessos
		ASTM C518	Aparelhos de medição do fluxo de calor
		ASTM C177	<i>Guarded hot plate</i>
Massa volúmica	kg/m ³	ISO 8990	<i>Calibrated and guarded hot box</i>
		EN 1602	-
Calor específico	J/(kg·K)	ASTM C303	-
		ISO 11357	-
Difusibilidade térmica	m ² /s	ASTM E1269	-
		ISO 22007-1	Princípios gerais
		ISO 22007-2	Método da fonte de calor
		ISO 22007-3	Método de análise da onda de temperatura
		ISO 22007-4	Método do flash laser

4.3.2 Caraterização acústica

A intensidade do ruído no interior dos edifícios tem vindo a aumentar gradualmente devido ao crescente número de fontes ruidosas, traduzindo-se num decréscimo do conforto acústico e em efeitos nocivos para a saúde. Com o objetivo de mitigar esses efeitos negativos, verifica-se uma crescente consciencialização relativamente à necessidade de realizar um tratamento acústico das construções, através da aplicação de materiais e soluções construtivas que apresentem um desempenho acústico eficaz (Tadeu *et al.*, 2010).

A caraterização acústica de um material de construção poderá ser realizada em termos de três principais propriedades: a capacidade de absorção das ondas sonoras incidentes, o isolamento à transmissão de sons aéreos e o isolamento à transmissão de sons de percussão. A absorção sonora define a parte da energia acústica incidente que é dissipada no interior de um material. A capacidade de um material em dissipar as ondas sonoras que nele incidem é avaliada pelo coeficiente de absorção sonora α , o qual é definido pela expressão:

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (6)$$

onde, E_a [J] é a energia acústica absorvida e E_i [J] a energia acústica incidente. Por sua vez, a energia acústica absorvida E_a [J], pode ser definida por:

$$E_a = E_i - E_r - E_t \quad (7)$$

em que, E_i [J] é a energia acústica incidente, E_r [J] é a energia acústica refletida, e E_t [J] é a energia acústica transmitida. A aplicação nas superfícies dos espaços interiores de edifícios de materiais com determinada capacidade de absorção sonora, permite alterar o tempo de reverberação dos mesmos, tornando possível otimizar o conforto acústico desses espaços em função do tipo de atividades neles desempenhadas. Por sua vez, a avaliação do isolamento sonoro relativamente aos sons aéreos e de percussão de uma solução construtiva é baseada na capacidade de redução da transmissão de energia acústica incidente proporcionada pela solução. A capacidade dos elementos construtivos em conseguir atenuar os sons por via aérea ou por percussão provenientes do meio exterior ou de compartimentos adjacentes é de extrema importância para mitigar ruídos indesejáveis e alcançar o conforto acústico no interior dos edifícios (Asdrubali *et al.*, 2015).

Embora o desempenho acústico de um material de construção possa ser definido por um índice único para efeitos de comparação com outros materiais, a caraterização acústica completa é realizada tendo em conta uma gama de frequências. Esta particularidade deve-se ao facto de as

capacidades de isolamento e de absorção sonoras de um material dependerem da frequência das ondas sonoras incidentes (Schiavoni *et al.*, 2016). No Quadro 4.2 e no Quadro 4.3 encontram-se apresentadas as normas mais utilizadas internacionalmente para a avaliação do coeficiente de absorção sonora e dos parâmetros de análise do isolamento sonoro de elementos construtivos, respetivamente.

Quadro 4.2 – Métodos de avaliação do coeficiente de absorção sonora de elementos construtivos.

Parâmetro	Norma	Nota
Coefficiente de absorção sonora	ISO 354	Câmara reverberante; amostra em tamanho real
Coefficiente de absorção sonora	ISO 10534-2	Tubo de impedância; amostras pequenas

Quadro 4.3 – Métodos de avaliação dos parâmetros de análise do isolamento sonoro de elementos construtivos.

Parâmetro	Unidades	Norma	Nota
Índice de redução sonora ponderado, R_w	dB	ISO 717-1	Valor único; câmara reverberante; amostras em tamanho real
Índice de redução sonora aparente e ponderado, R'_w	dB	ISO 717-1	Valor único; in situ; amostras em tamanho real
Índice de redução sonora, R	dB	ISO 10140	Câmara reverberante; amostras em tamanho real
Índice de redução sonora aparente, R'	dB	EN 12354-1	Estimativa
Perda de Transmissão, TL	dB	ISO 16283-1	In situ, amostras em tamanho real
Redução da transmissão de sons de percussão ponderada, ΔL_w	dB	-	Tubo de impedância; amostras pequenas
Redução da transmissão de sons de percussão, ΔL	dB	ISO 717-2	Valor único; câmara reverberante; amostras em tamanho real
Índice de isolamento sonoro a sons de percussão normalizado e ponderado, $L_{n,w}$	dB	EN 12354-2	Estimativa
Índice de isolamento sonoro a sons de percussão normalizado, L_n	dB	ISO 10140	Câmara reverberante; amostras em tamanho real
Índice de isolamento sonoro a sons de percussão normalizado, aparente e ponderado, $L'_{n,w}$	dB	EN 12354-2	Estimativa
Índice de isolamento sonoro a sons de percussão normalizado e aparente, L'_n	dB	ISO 717-2	Valor único; in situ; amostras em tamanho real
Rigidez dinâmica	MN/m ³	ISO 16283-2	In situ; amostras em tamanho real
		ISO 9052-1	Laboratório; amostras pequenas

4.3.3 Caraterização ambiental

As crescentes preocupações, nas últimas décadas, em torno dos problemas ambientais têm levado à implementação, nos diversos setores de atividade, de várias medidas direcionadas para a promoção de práticas sustentáveis e menos gravosas para o ambiente. O setor da construção,

como um dos setores onde se consome maiores quantidades de energia e de onde surgem impactos ambientais significativos (Belakroum *et al.*, 2018), constitui-se como uma área fundamental para o desenvolvimento e aplicação de soluções mais sustentáveis que minimizem os impactos ambientais negativos inerentes a este setor. Desta maneira, a realização de uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) das várias componentes do edifício e do próprio edifício como um todo tem-se tornado cada vez mais importante, na medida em que permite analisar os impactos associados desde a extração dos materiais até ao fim de vida da construção.

A ACV é uma metodologia desenvolvida com o objetivo de realizar uma avaliação dos impactos no ambiente e na saúde de produtos e serviços ao longo do seu ciclo de vida (Figura 4.3). Esta análise pode ser aplicada tendo em conta duas abordagens: “do berço ao túmulo”, onde se consideram todas as etapas do ciclo de vida do produto ou serviço, desde a extração da matéria-prima até ao seu fim de vida; ou “do berço às portas”, na qual se consideram apenas as fases do ciclo de vida até ao transporte do produto ou serviço aos consumidores.

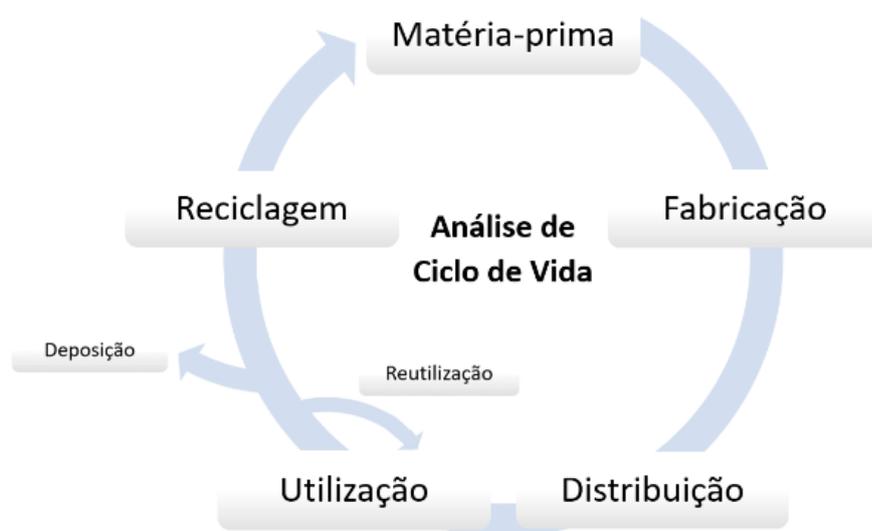


Figura 4.3 – Metodologia de análise do ciclo de vida.

Dos vários indicadores que podem ser utilizados na avaliação do impacto ambiental quando se realiza uma ACV de um produto ou serviço, o Consumo de Energia Primária e o Potencial de Aquecimento Global são os mais utilizados. O primeiro indicador representa a energia primária consumida, diretamente ou indiretamente, durante todo o ciclo de vida do produto. Por sua vez, o segundo indicador corresponde a um método definido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e avalia as emissões de gases de efeito de estufa durante o ciclo de vida do produto, podendo ser expresso em três períodos de horizonte (20, 50 e 100 anos) (Asdrubali *et al.*, 2015). Os indicadores referidos anteriormente, bem como outros indicadores

geralmente utilizados na Análise de Ciclo de Vida de materiais e produtos, e respetivas unidades, encontram-se apresentados no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Indicadores utilizados na Análise de Ciclo de Vida de materiais e produtos.

Indicador	Unidades
Consumo de energia primária	MJ
Potencial de aquecimento global	g CO ₂ -equivalente
Potencial de destruição da camada de ozono	g CFC11-equivalente
Potencial de acidificação	g SO ₂ -equivalente
Potencial de eutrofização	g PO ₄ -equivalente
Consumo de água	l
Geração de resíduos perigosos	kg

4.3.4 Comportamento ao fogo

Um dos mais importantes fatores para a segurança de um edifício é o comportamento ao fogo dos seus materiais constituintes. Como tal, na seleção de um material de construção, características como a temperatura de ignição e a produção de fumo devem ser consideradas. Na avaliação do comportamento ao fogo de um material ou elemento de construção, dois tipos de análise podem ser elaborados: resistência ao fogo e reação ao fogo. A resistência ao fogo é a medida da capacidade de um material ou elemento de construção para resistir, e idealmente prevenir, a passagem do fogo de um compartimento para outro. Por outro lado, a reação ao fogo mede a forma como um material ou sistema irá contribuir para o desenvolvimento e expansão do fogo, particularmente nas primeiras fases quando a evacuação é crucial. A reação ao fogo de um material pode ser avaliada usando o sistema de classificação definido na norma europeia EN 13501-1. Segundo esta norma, os materiais são classificados segundo as classes A1, A2, B, C, D ou E (F se o desempenho não foi determinado), correspondendo a classe A1 ao melhor desempenho e a E ao pior (Schiavoni *et al.*, 2016). Os parâmetros utilizados na definição da classificação segundo a norma europeia EN 13501-1, estão apresentados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Parâmetros utilizados na definição da classificação de reação ao fogo segundo a norma europeia EN 13501-1.

Código	Descrição
DT	<i>Temperature increase</i>
Dm	<i>Mass loss</i>
Tf	<i>Time of sustained flaming of the specimen</i>
PCS	<i>Gross calorific potential</i>
FIGRA	<i>Fire grown rate index</i>
THR _{600s}	<i>Total heat release</i>
LFS	<i>Lateral flame spread</i>
SMOGRA	<i>Smoke growth rate index</i>
Fs	<i>Flame spread</i>
TSP _{600s}	<i>Total smoke production</i>

4.3.5 Permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade de um material relativamente ao vapor de água pode ser avaliada através do cálculo do fator de resistência à permeação ao vapor de água (valor- μ). Este parâmetro adimensional mede a resistência que um material apresenta face ao atravessamento do vapor de água comparativamente com as propriedades do ar, sendo que valores mais baixos deste parâmetro correspondem a níveis de permeabilidade mais elevados. Outro parâmetro utilizado na avaliação da resistência ao vapor de água de materiais é a espessura da camada de ar equivalente s_d . O parâmetro s_d representa a espessura da camada de ar equivalente que possui a mesma resistência ao vapor de água que o material analisado e é calculado a partir do produto do valor- μ com a espessura do material, sendo expresso em metros (Builddesk, 2020). Consoante o valor de s_d , um material pode ser classificado como: i) barreira ao vapor, se $s_d \geq 1000-1500$ m, ou ii) retardante de vapor, se $s_d \geq 10$ m (Schiavoni *et al.*, 2016). A determinação do valor- μ de materiais de isolamento pode ser feita tendo como referência as normas europeias EN 12086 e EN 12088, as quais definem os procedimentos para quantificar a quantidade de água absorvida por difusão a longo prazo.

4.4 Soluções de isolamento térmico convencionais

4.4.1 Lã de rocha

A lã de rocha é um material de isolamento inorgânico e fibroso vastamente utilizado no setor da construção. As propriedades exibidas por este material possibilitam a sua utilização numa vasta gama de aplicações, uma vez que é incombustível, suporta temperaturas elevadas, é adaptável e proporciona resistência a impactos biológicos, químicos e mecânicos (Karamanos *et al.*, 2008). A lã de rocha para aplicação em edifícios como isolamento térmico é, normalmente, comercializada em painéis ou rolos, e apresenta valores de massa volúmica entre 40 e 200 kg/m³ (Figura 4.4) (Schiavoni *et al.*, 2016).



Figura 4.4 – Lã de rocha (Thermal Engineering, 2020).

No processo de fabrico deste material, numa primeira fase, procede-se à fusão de uma mistura de vários tipos de rocha num forno a uma temperatura de cerca de 1500 °C. De seguida, a mistura fundida é sujeita a um processo de centrifugação onde, no final do qual, se obtém um conjunto de fibras soltas que constituem o material de base para a produção da lã de rocha. Posteriormente, resinas especiais são injetadas nas fibras e o material resultante é compactado mecanicamente de maneira a obter a forma pretendida. Por fim, essa mistura é colocada em fornos de polimerização, onde as resinas se combinam com as fibras, solidificam e endurecem o material, dando origem à configuração final da lã de rocha (Karamanos *et al.*, 2008).

A lã de rocha é caracterizada por valores do coeficiente de condutibilidade térmica entre 0,033 e 0,040 W/(m·°C), e de calor específico entre 0,8 e 1,0 kJ/(kg·°C) (Schiavoni *et al.*, 2016). A transferência de calor neste material ocorre através quatro modos: por radiação, por condução através do meio sólido, por condução através do meio gasoso e por convecção devido ao movimento do ar. No entanto, uma vez que os movimentos de ar são praticamente inexistentes devido às pequenas dimensões das cavidades deste material, a transferência de calor por convecção pode ser desprezada. Um dos principais fatores que podem influenciar o desempenho térmico da lã de rocha é a temperatura de operação. Em função da temperatura de operação, o coeficiente de condutibilidade térmica e a influência de cada modo de transferência de calor sofrem alterações significativas (Figura 4.5) (Karamanos *et al.*, 2008).

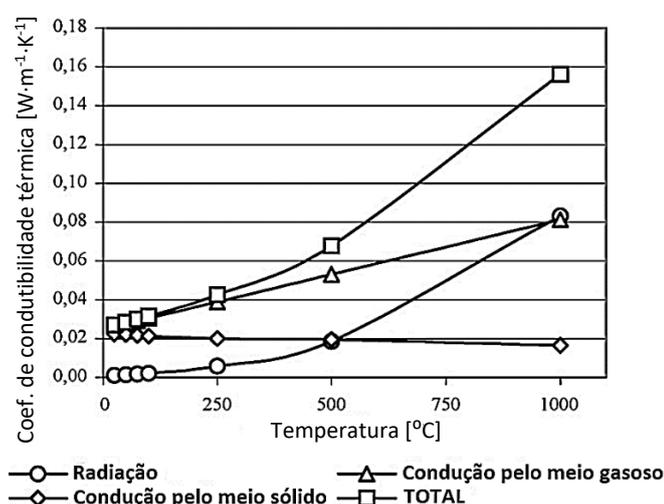


Figura 4.5 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica da lã de rocha e influência de cada modo de transferência de calor em função da temperatura de operação (adaptada de Karamanos *et al.*, 2008).

Num estudo realizado por Abdou e Budaiwi (Abdou e Budaiwi, 2005) analisou-se a influência da temperatura de operação em amostras de lã de rocha de diferentes massas volúmicas. De

acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o aumento da temperatura de operação provoca um aumento do coeficiente de condutibilidade térmica do material, sendo que a maior taxa de variação ($\Delta\lambda/\Delta^\circ\text{C}$) ocorre numa amostra de massa volúmica igual a $71,2 \text{ kg/m}^3$, onde se regista um incremento do coeficiente de condutibilidade térmica igual a $0,0002297 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ por cada variação unitária de temperatura (Figura 4.6).

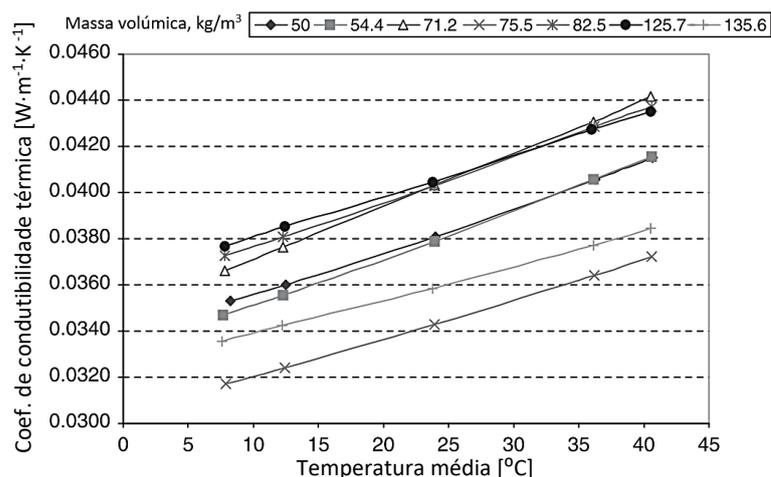


Figura 4.6 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica da lã de rocha em função da temperatura de operação (adaptada de Abdou e Budaiwi, 2005).

Outro fator que influencia o coeficiente de condutibilidade térmica da lã de rocha é a presença de humidade. A natureza hidrofílica da lã de rocha propicia a absorção de água, e a sua presença entre as fibras do material afeta significativamente o coeficiente de condutibilidade térmica. Para além disso, a presença a longo prazo de água ou a exposição prolongada a altas temperaturas podem conduzir à fragilização das propriedades mecânicas da lã de rocha, uma vez que afetam as resinas que ligam as fibras e, conseqüentemente, reduzem a resistência à compressão e à tração do material (Karamanos *et al.*, 2008).

De acordo com Zabalza *et al.* (2011), 1 kg de lã de rocha com massa volúmica de 60 kg/m^3 , durante todo o seu ciclo de vida, apresenta um Potencial de Aquecimento Global de $1,511 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$, e é responsável por um consumo de energia primária e de água de $26,393 \text{ MJ}_{\text{eq}}$ e de 32 litros, respetivamente. Noutro estudo (Schmidt *et al.*, 2004), refere-se que a lã de rocha, por unidade funcional, é responsável por um consumo de energia de $20,75 \text{ MJ}$, sendo que grande parte desse consumo se deve à utilização de combustíveis fósseis durante o seu processo de fabrico. No âmbito acústico, a lã de rocha proporciona um coeficiente de absorção sonora de 0,9 para uma espessura de material de 5 cm (Asdrubali *et al.*, 2012). A utilização em grande escala da lã de rocha como material de isolamento térmico faz com que a reciclagem deste material tenha uma importância acrescida. A reciclagem da lã de rocha deve incidir não só sobre

os desperdícios gerados durante a sua produção, mas também sobre os resíduos resultantes da demolição ou renovação dos edifícios (Schultz-Falk *et al.*, 2018). A reutilização da lã de rocha também é possível de ser realizada, no entanto deve existir a absoluta certeza que o desempenho térmico do material continua a estar garantido (Schmidt *et al.*, 2004). Relativamente aos impactos da lã de rocha na saúde humana, de acordo com Ballagh (1996) existem algumas preocupações em relação a possíveis efeitos nocivos para a saúde e, como tal, deve haver determinados procedimentos de segurança durante o manuseamento e instalação deste material.

4.4.2 Poliestireno expandido (EPS)

O poliestireno expandido (EPS) é um material de isolamento térmico rígido, comercializado, frequentemente, na forma de painéis (Figura 4.7). Este material é produzido a partir de pequenos grãos de poliestireno com um diâmetro entre 0,2 e 0,3 mm. A adição de um agente de expansão, como por exemplo o gás pentano, e o aquecimento através de vapor de água, permitem que os grãos de poliestireno aumentem de volume, podendo atingir até 50 vezes o seu volume original (Figura 4.8). Os grãos expandidos permanecem unidos nas suas áreas de contato e formam, no seu conjunto, uma estrutura porosa parcialmente aberta. O EPS apresenta, normalmente, uma cor branca, no entanto, alguns tipos inovadores de EPS são cinzentos devido à adição de grafite com o intuito de melhorar substancialmente o desempenho térmico (Calbureanu *et al.*, 2010).



Figura 4.7 – Placas de EPS (Nuclear Power, 2020).

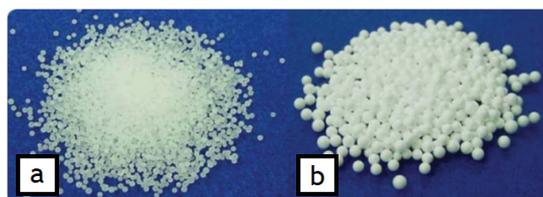


Figura 4.8 – Grãos de poliestireno: a) antes do processo de expansão; b) após o processo de expansão (Insulation Corporation of America, 2020).

Tipicamente, os painéis de EPS apresentam massas volúmicas compreendidas entre 15 e 35 kg/m³, e podem ser facilmente cortados, perfurados e ajustados em local de obra sem perder o seu desempenho térmico (Schiavoni *et al.*, 2016). Inúmeras vantagens estão associadas à utilização de EPS como material de isolamento térmico. Este material é leve, versátil, dimensionalmente estável, inerte, de baixo custo, resistente à biodegradação, não tóxico, proporciona uma significativa resistência à compressão e encontra-se disponível em vários tamanhos e massas volúmicas (Agham, 2012).

Normalmente, o coeficiente de condutibilidade térmica do EPS varia entre 0,031 e 0,037 W/(m·K), e o seu calor específico ronda os 1,25 kJ/(kg·K) (Schiavoni *et al.*, 2016). No entanto, o desempenho térmico deste material varia em função da temperatura, da massa volúmica e do teor de humidade. Num estudo realizado por Lakatos e Kalmár (2013) analisou-se o comportamento térmico de amostras de EPS de diferentes massas volúmicas e sujeitas a diferentes teores de humidade. Os resultados obtidos demonstram que o coeficiente de condutibilidade térmica assume valores maiores quando a massa volúmica diminui ou quando o teor de humidade aumenta. Num outro estudo (Jerman e Černý, 2012), onde se analisou a influência do teor de humidade no desempenho térmico deste material, verificou-se um aumento do coeficiente de condutibilidade térmica de 0,037 W/(m·K), em condições secas, para 0,051 W/(m·K), em condições saturadas, numa amostra de EPS com massa volúmica de 16,5 kg/m³ (Figura 4.9).

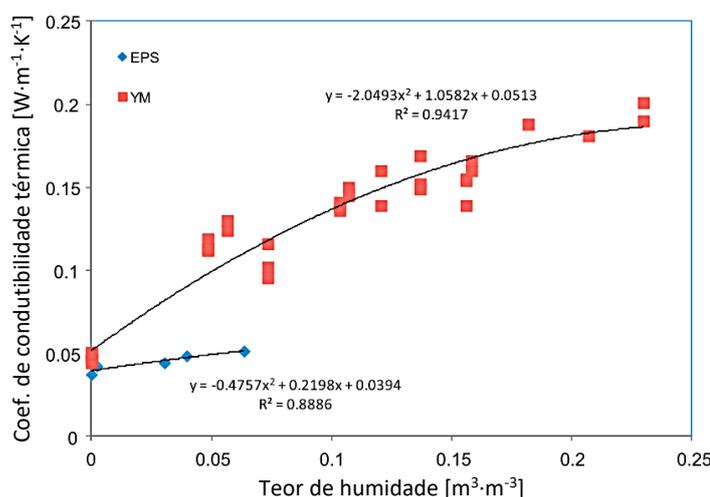


Figura 4.9 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica do EPS em função do teor de humidade (adaptada de Jerman e Černý, 2012).

Uma das vertentes onde o EPS apresenta um fraco desempenho é a vertente acústica. Devido à sua porosidade fechada e à sua baixa massa volúmica, o EPS não apresenta qualquer

propriedade acústica significativa. Relativamente à reação ao fogo, o EPS trata-se de um material facilmente inflamável que liberta gases perigosos durante a sua queima, pelo que é frequente a aplicação de um retardante ao fogo durante o processo de fabrico. De acordo com a classificação de reação ao fogo definida pela norma europeia EN 13501-1, o EPS pertence à classe E (Schiavoni *et al.*, 2016). A energia incorporada e o potencial de aquecimento global do EPS apresentam valores de 1125 kWh/m³ e de 8,25 kgCO_{2eq}/(unidade funcional), respetivamente (Aditya *et al.*, 2017). O EPS é um material 100% reciclável, sendo o seu processo de reciclagem realizado por indústrias especializadas (Agham, 2012). Por fim, a resistência ao vapor de água é uma das propriedades mais valiosas deste material. O fator de resistência à permeação ao vapor de água, μ , varia entre 20 e 70, permitindo que o EPS possa ser utilizado como isolamento térmico de elementos da envolvente situados em zonas onde a presença de água seja frequente (Gnip *et al.*, 2012).

4.5 Soluções de isolamento térmico alternativas

4.5.1 Fibra de celulose

A fibra de celulose é um material de isolamento com reduzidos impactos ambientais negativos e que pode ser utilizado, principalmente, para melhorar o desempenho térmico e acústico das envolventes (Figura 4.10). O seu fabrico é realizado, geralmente, a partir de papel de jornal reciclado em conjunto com alguns aditivos, como o ácido bórico e o borato de sódio, que melhoram as propriedades das fibras (Cuce *et al.*, 2014). Embora possa ser adquirido também na forma de painéis, este material é, tipicamente, comercializado sob a forma de fibras soltas destinadas a serem projetadas em pavimentos de sótãos, tetos e paredes. A massa volúmica deste produto apresenta, normalmente, valores entre 30 e 80 kg/m³ (Schiavoni *et al.*, 2016) (Figura 4.11).



Figura 4.10 – Fibra de celulose (Epicentro, 2020).



Figura 4.11 – Aplicação de fibras de celulose por projeção (DDN, 2020).

O coeficiente de condutibilidade térmica das fibras de celulose apresenta, tipicamente, valores entre 0,037 e 0,042 W/(m·K) e os valores do calor específico encontram-se entre 1,3 e 1,6 kJ/(kg·K) (Schiavoni *et al.*, 2016). No entanto, o valor do coeficiente de condutibilidade térmica pode sofrer alterações consoante o processo de fabrico, a qualidade da matéria-prima, a massa volumica, a temperatura de operação e o teor de humidade (Hurtado *et al.*, 2016). Como exemplo, de acordo com um estudo realizado por Tye e Spinney (1979) onde se analisou a influência da temperatura de operação e do teor de humidade no valor do coeficiente de condutibilidade térmica das fibras de celulose, verificou-se que para uma temperatura média de 15 °C e uma diferença de temperaturas de aproximadamente 10 °C, o valor do coeficiente de condutibilidade térmica aumentou cerca de 15% para um ganho do teor de humidade de 10%.

A elasticidade proporcionada pelas fibras de celulose permite que estas sejam utilizadas como material resiliente em pavimentos flutuantes, sob a forma de painéis. Para além disso, tirando partido dos seus valores de porosidade e de resistividade ao fluxo de ar, a fibra de celulose é adequada para fins de melhoramento da absorção sonora de soluções construtivas (Schiavoni *et al.*, 2016).

A elevada inflamabilidade e a propensão para o desenvolvimento de fungos são os dois principais aspetos negativos associados a este material. De forma a minimizar esses dois problemas, as fibras de celulose são, frequentemente, tratadas com aditivos como o ácido bórico e o borato de sódio, que reduzem o nível de inflamabilidade do material e atuam como fungicida (Hurtado *et al.*, 2016).

Comparativamente com outros materiais de isolamento, a energia incorporada associada às fibras de celulose apresenta valores bastante baixos. Considerando 1 kg deste material, a energia incorporada varia entre 0,94 e 3,3 MJ (Hurtado *et al.*, 2016).

4.5.2 Lã de ovelha

A utilização da lã de ovelha como material de isolamento acontece há centenas de anos. A lã de ovelha é um material natural e sustentável, que pode ser facilmente renovado e reciclado. Para além disso, a lã de ovelha constitui-se como um material confortável, fácil de manusear e não apresenta potenciais riscos para a saúde humana (Cuce *et al.*, 2014). A comercialização deste material como isolamento é, tipicamente, realizada em rolos, tendo valores de massa volúmica entre 10 e 25 kg/m³ (Schiavoni *et al.*, 2016) (Figura 4.12).



Figura 4.12 – Lã de ovelha como material de isolamento (Build It, 2020).

Geralmente, o coeficiente de condutibilidade térmica dos materiais em lã de ovelha varia entre 0,038 e 0,054 W/(m·°C), e a sua aplicação em edifícios como isolamento térmico pode ser eficaz. Zach *et al.* (2012) realizaram um estudo onde avaliaram o desempenho térmico de amostras de lã de ovelha com diferentes massas volúmicas, variando entre 20 kg/m³ e 40 kg/m³, sujeitas a quatro temperaturas médias de operação: 10 °C, 20 °C, 30 °C e 40 °C. A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o aumento da massa volúmica de 20 kg/m³ para 40 kg/m³ reduz o coeficiente de condutibilidade térmica do material em 15% a 10 °C, 18% a 20 °C, e 20% a 30 e 40 °C (Figura 4.13). Por outro lado, o aumento da temperatura média de operação de 10 °C até 40 °C provocou um aumento do coeficiente de condutibilidade térmica em todas as amostras, tendo-se registado a maior subida na amostra de menor massa volúmica (25%) e a menor subida na de maior massa volúmica (16%) (Figura 4.14).

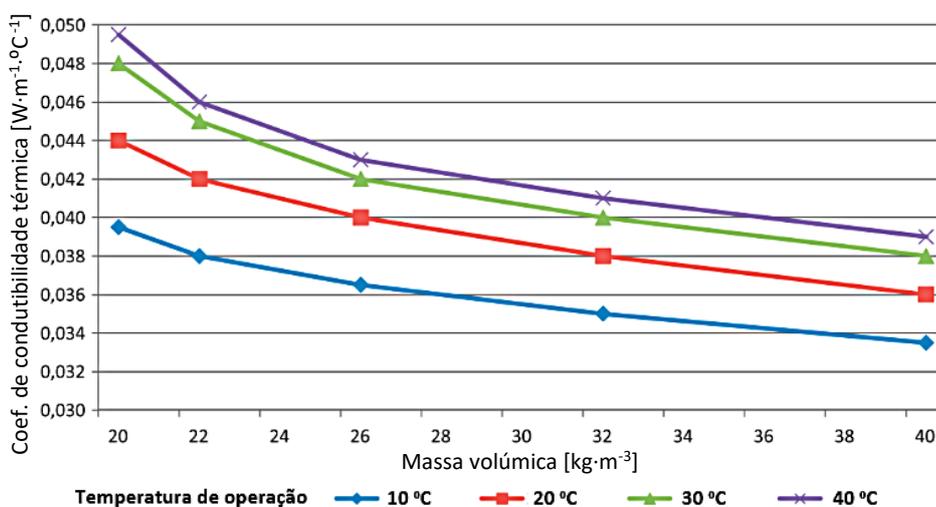


Figura 4.13 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica da lã de ovelha em função da massa volúmica (adaptada de Zach *et al.*, 2012).

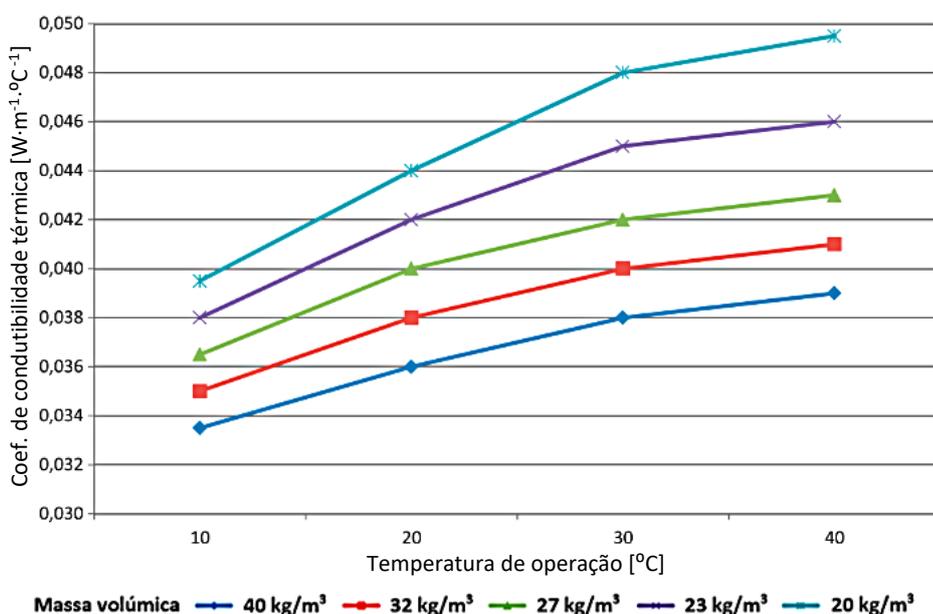


Figura 4.14 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica da lã de ovelha em função da temperatura de operação (adaptada de Zach *et al.*, 2012).

A verificação do maior aumento do valor do coeficiente de condutibilidade térmica na amostra de menor massa volúmica deve-se à maior porosidade e intensidade do fluxo de ar na estrutura porosa do isolamento. Posto isto, constata-se que o aumento da massa volúmica do material conduz à melhoria das propriedades térmicas do material e reduz a sua sensibilidade face às variações da temperatura de operação.

Outra propriedade importante da lã de ovelha é a sua elevada higroscopicidade, que pode atingir valores até 35% em condições normais. A capacidade de o material absorver grandes quantidades de vapor de água permite regular a humidade e melhora a qualidade do ar interior. Avaliando a influência do teor de humidade no desempenho térmico da lã de ovelha, é possível verificar que, a partir de teores de humidade de cerca de 20% o material sofre alterações significativas do seu coeficiente de condutibilidade térmica (Zach *et al.*, 2012) (Figura 4.15).

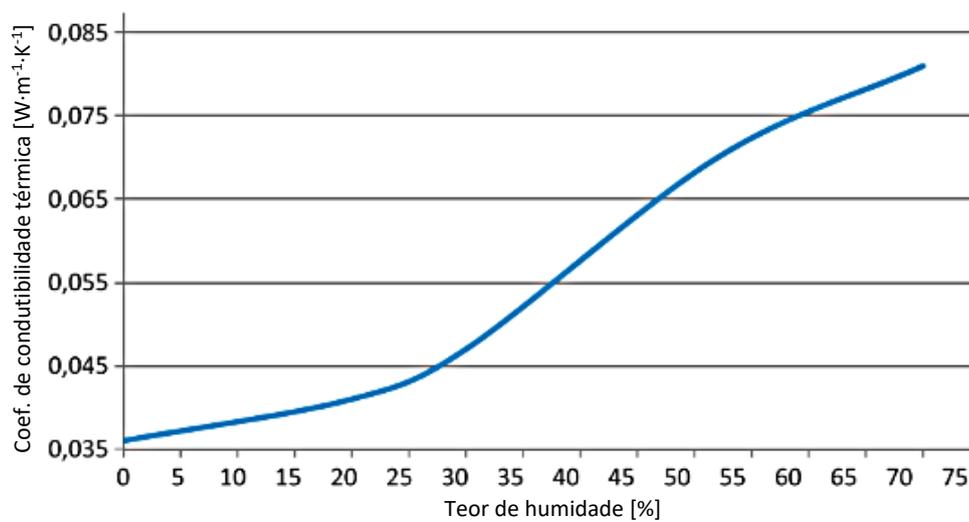


Figura 4.15 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica em função do teor de humidade (adaptada de Zach *et al.*, 2012).

A lã de ovelha também pode ser usada com funções acústicas. De acordo com um estudo realizado por Ballagh (1996) onde se analisaram as propriedades acústicas da lã de ovelha, uma amostra de espessura igual a 75 mm e com uma resistência ao fluxo de ar de 1200 Rayls/s, atingiu valores do coeficiente de absorção sonora, para uma incidência aleatória, superiores a 0,8 em frequências acima dos 500 Hz. Relativamente ao comportamento ao fogo deste material, verifica-se que a lã de ovelha apresenta um nível de inflamabilidade baixo, pertencendo às classes B1 ou B2 da classificação à reacção ao fogo definida pela norma europeia EN 13501-1 (Patnaik *et al.*, 2015; Asdrubali *et al.*, 2015).

Comparativamente com outros materiais de isolamento, os impactos ambientais negativos verificados ao longo do ciclo de vida deste material de isolamento são muito reduzidos. Os processos de fabrico dos produtos de isolamento em lã de ovelha apresentam, geralmente, uma elevada eficiência energética (Zach *et al.*, 2012). A energia incorporada associada à lã de ovelha apresenta um valor de 30 kWh/m³ e o seu potencial de aquecimento global é de 1,46 kgCO₂-eq por unidade funcional (Aditya *et al.*, 2017; Asdrubali *et al.*, 2015).

4.6 Soluções de isolamento térmico inovadoras

4.6.1 Aerogel

O aerogel é considerado um dos mais promissores materiais de isolamento térmico de alto desempenho para aplicação em edifícios (Figura 4.16). Este material é produzido a partir da extração da componente líquida de um gel, recorrendo a um processo de secagem supercrítica que evita o colapso da sua estrutura sólida (Aditya *et al.*, 2017). Embora existam outros tipos de aerogéis, como o aerogel de carbono ou de óxido de alumínio, os aerogéis de sílica são o tipo de aerogel mais utilizado e investigado, sendo compostos por uma estrutura interna reticulada constituída por cadeias de dióxido de silício (SiO_2) (Cuce *et al.*, 2014).

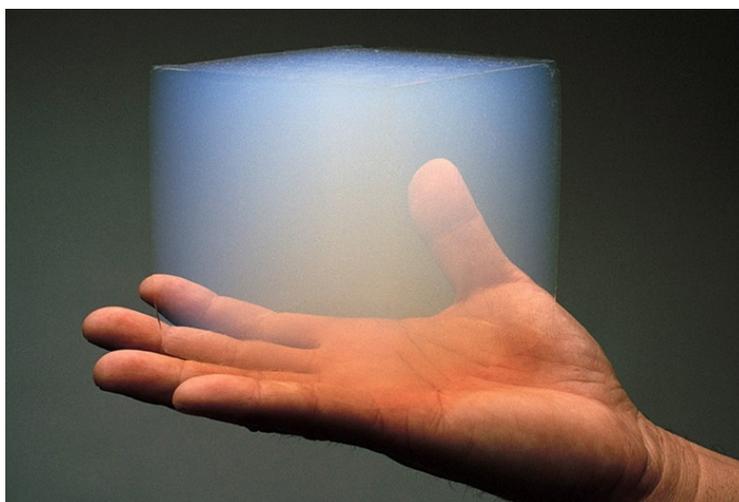


Figura 4.16 – Aerogel (NASA, 2020).

Os aerogéis são caracterizados por apresentarem uma estrutura altamente porosa, sendo que nos aerogéis de sílica a porosidade atinge valores entre 85% e 99,8% (Schiavoni *et al.*, 2016). Para além disso, os poros deste material possuem diâmetros de dimensão muito reduzida, variando entre 10 e 100 nm nos aerogéis puros, e entre 5 e 70 nm nos aerogéis de sílica (Cuce *et al.*, 2014). Embora a elevada porosidade deste material possibilite que se atinjam valores de massa volúmica de 3 kg/m^3 , os aerogéis para aplicação em edifícios possuem, geralmente, valores de massa volúmica entre 70 e 150 kg/m^3 (Baetens *et al.*, 2011).

Em consequência da elevada porosidade e do reduzido tamanho dos poros, os aerogéis exibem propriedades físicas, térmicas, óticas e acústicas notáveis, que permitem a sua utilização em edifícios para diversas finalidades. A reduzida condutibilidade térmica através do esqueleto sólido e do meio gasoso, e a reduzida transmissão de radiação infravermelha permitem que o

coeficiente de condutibilidade térmica dos aerogéis seja bastante baixo comparativamente com o dos materiais de isolamento térmico convencionais. Tipicamente, o coeficiente de condutibilidade térmica dos aerogéis varia entre 12 e 20 mW/(m·K), podendo, nalguns casos, atingir o valor de 8 mW/(m·K), mediante a redução do fluxo de calor por condução pelo meio gasoso, que pode ser obtida preenchendo o aerogel com um gás de baixa condutibilidade, reduzindo o máximo diâmetro dos poros, ou aplicando vácuo no material (Cuce *et al.*, 2014; Baetens *et al.*, 2011). O excelente desempenho térmico aliado à estabilidade dimensional deste material permite a sua utilização na envolvente opaca dos edifícios como isolamento térmico, geralmente, em forma de manta (Figura 4.17). Este material é caracterizado por um valor de calor específico igual a 1,0 kJ/(kg·K) e por um fator de permeabilidade ao vapor de água entre 5,0 e 5,5 (Schiavoni *et al.*, 2016).



Figura 4.17 – Material de isolamento de aerogel em forma de manta (Baetens *et al.*, 2011).

Os aerogéis de sílica apresentam elevados níveis de transmissão da radiação com comprimentos de onda correspondentes à luz visível (400 nm a 700 nm) (Figura 4.18) que conferem uma determinada translucidez, e que permitem a sua aplicação, por exemplo, em vidros de janelas ou em coberturas e fachadas com aproveitamento de luz natural (Baetens *et al.*, 2011) (Figura 4.19). Para além disso, em virtude das suas propriedades acústicas, os aerogéis são também um bom material de isolamento sonoro. De acordo com Ricciardi *et al.* (2002), através da combinação de múltiplas camadas de aerogel granular de vários tamanhos, com uma espessura total de 7 cm, alcançou-se uma atenuação sonora média de 60 dB. Devido à sua estrutura inorgânica os aerogéis são um material não inflamável que resiste a temperaturas até 1200 °C e podem, portanto, ser utilizados em edifícios como retardante ao fogo. Outra possível aplicação dos aerogéis é a sua utilização como purificador do ar interior dos edifícios, uma vez que este material apresenta a capacidade de filtrar, de forma eficaz, vários contaminantes presentes no ar (Cuce *et al.*, 2014).

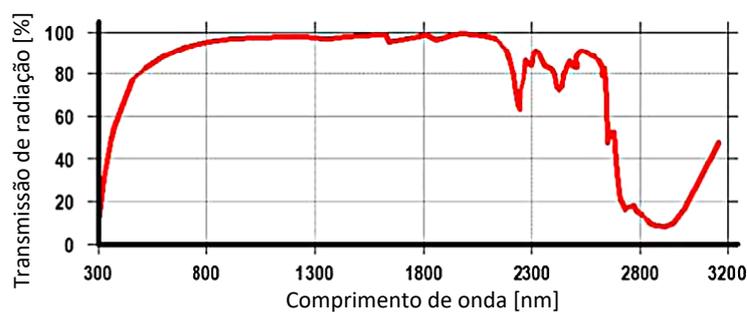


Figura 4.18 – Transmissão de radiação nos aerogéis de sílica (adaptada de Baetens *et al.*, 2011).



Figura 4.19 – Aplicação de aerogel em fachadas e coberturas para aproveitamento de luz natural (Kalwall, 2020).

Uma das principais vantagens associadas à utilização de aerogéis como material de isolamento térmico é a ocupação de pouco espaço. Comparativamente com materiais de isolamento térmico convencionais, os aerogéis apresentam um coeficiente de condutibilidade térmica bastante mais baixo, permitindo que a espessura necessária para atingir um determinado valor do coeficiente de transmissão térmica (U) de um elemento construtivo seja muito inferior. Este aspeto também é importante na realização de operações de reabilitação e de reconstrução de edifícios existentes, uma vez que a espessura disponível para proceder a este tipo de intervenções é, geralmente, reduzido (Cuce *et al.*, 2014).

Um dos aspetos negativos relacionados com os aerogéis é a sua baixa resistência mecânica. Em consequência da reduzida dimensão dos poros e da elevada porosidade, os aerogéis apresentam uma resistência à tração muito reduzida que torna este material bastante frágil (Baetens *et al.*, 2011). Outro aspeto negativo, e que impede a comercialização em grande escala dos aerogéis,

é o seu elevado custo comparativamente com o custo de materiais de isolamento convencionais. Considerando o mesmo coeficiente de transmissão térmica, U , o custo, por m^2 , do aerogel pode ser cerca de 20 vezes superior ao custo de um material de isolamento convencional. No entanto, apesar do elevado custo, a aplicação de aerogéis em edifícios pode significar um substancial ganho de área útil e uma redução dos custos de operação, pelo que a utilização deste material, considerando todos os benefícios envolvidos, pode ser vantajosa economicamente relativamente a outros materiais convencionais, mesmo tendo custos superiores (Koebel *et al.*, 2012) (Figura 4.20). Para além disso, previsões futuras indicam que o custo do aerogel irá sofrer uma redução significativa nas próximas décadas, o que poderá torná-lo no material de isolamento líder de mercado devido ao seu superior desempenho térmico, acústico e visual (Cuce *et al.*, 2014).

Material	Aerogel	Isolamento convencional
λ [$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$]	0,015	0,032
Espessura para $U = 0,2$ [$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$]	7,5 cm	16 cm
Custo por m^2	280 USD	15 USD

USD - United States Dollars

Figura 4.20 – Comparação entre os ganhos de espaço e o custo de materiais de isolamento convencionais e os aerogéis (adaptada de Koebel *et al.*, 2012).

Relativamente aos impactos na saúde humana associados ao aerogel, a maior preocupação prende-se com a presença de sílica cristalina. A inalação de poeiras que contenham sílica cristalina pode resultar em doenças respiratórias como o enfisema e a silicose. De forma a minimizar esse risco durante a sua instalação, devem-se usar máscaras, aplicar ao material uma capa de borracha, plástico ou alumínio, e realizar a instalação no menor espaço de tempo possível.

A energia incorporada associada ao aerogel é de cerca de 53 MJ/kg (Cuce *et al.*, 2014). Na Figura 4.21 apresenta-se o valor da energia incorporada, por m^2 , de oito materiais de isolamento térmico, incluindo o aerogel, tendo em conta a espessura de isolamento necessária para obter um determinado valor do coeficiente de transmissão térmica de uma parede. Analisando a informação fornecida, verifica-se que a energia incorporada, por m^2 , do aerogel é de cerca de 200 MJ, sendo o segundo valor mais baixo entre os materiais de isolamento térmico considerados (Cuce *et al.*, 2014).

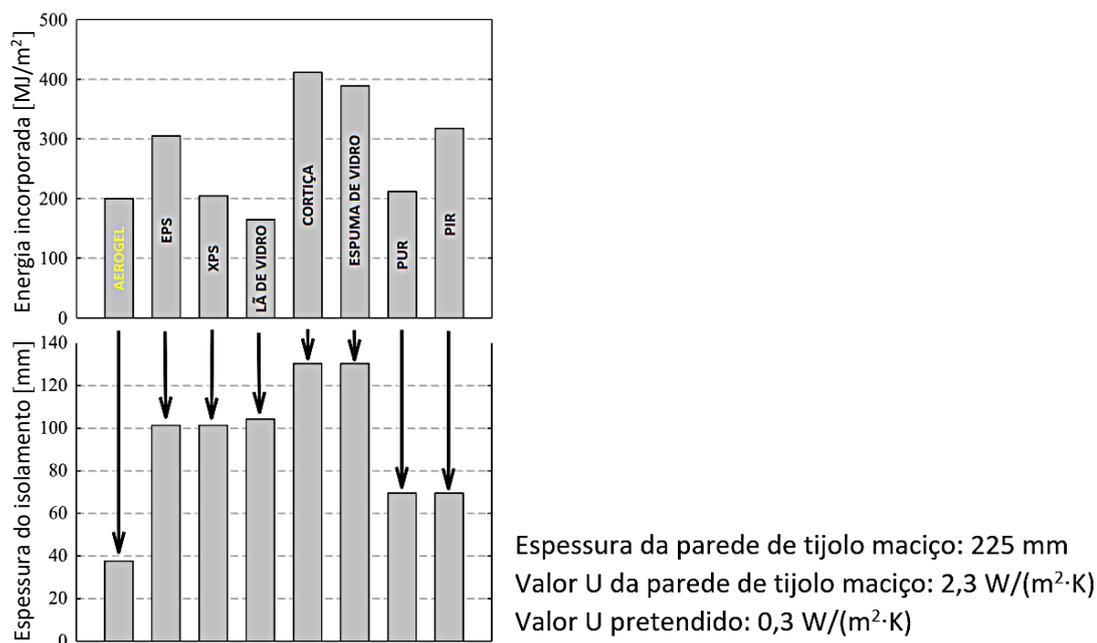


Figura 4.21 – Comparação entre os valores de energia incorporada e da espessura para o aerogel e materiais de isolamento convencionais (Cuce *et al.*, 2014).

4.6.2 Painéis de isolamento a vácuo

Os painéis de isolamento a vácuo (VIP) são soluções de isolamento térmico de desempenho extremamente elevado cujo funcionamento se baseia na ausência ou redução da pressão do meio gasoso no interior de um material de estrutura porosa aberta (Figura 4.22). Estes painéis são constituídos por três componentes principais: i) núcleo; ii) invólucro; e iii) produtos adicionais, como os absorventes, dessecantes e opacificadores (Aditya *et al.*, 2017) (Figura 4.23).

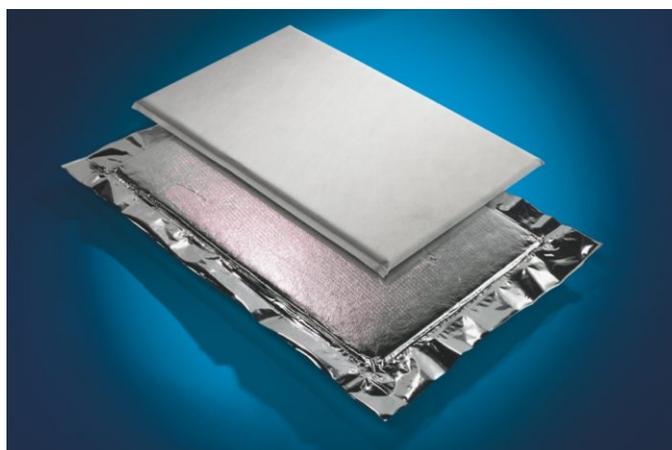


Figura 4.22 – Painel de isolamento a vácuo (Green Building Advisor, 2020b).

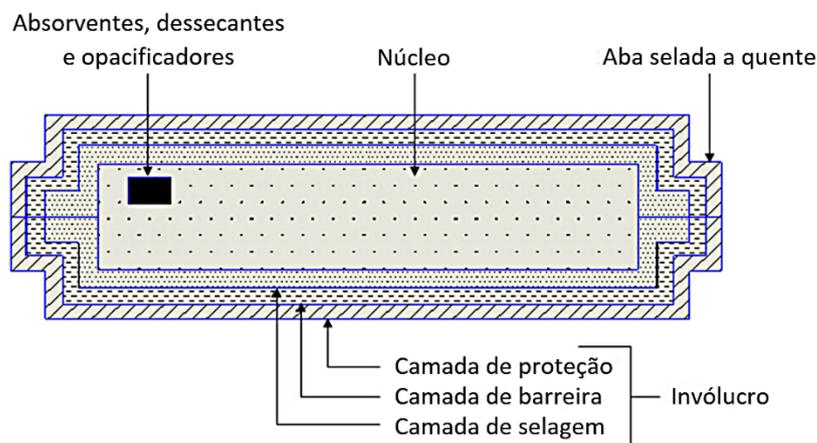


Figura 4.23 – Estrutura dos painéis de isolamento a vácuo (adaptada de Alam *et al.*, 2011).

O material utilizado como núcleo dos VIPs deve satisfazer determinados requisitos de forma a minimizar o fluxo de calor através dos painéis. Primeiramente, com o objetivo de diminuir ao máximo a transferência de calor pelo meio gasoso, o material do núcleo deve apresentar uma estrutura porosa 100% aberta para permitir retirar a totalidade ou grande parte do ar presente no interior do material, e o diâmetro dos poros deve ser o mais reduzido possível. O fluxo de calor por condução através do meio gasoso é tanto menor quanto mais reduzidos forem a pressão do meio gasoso e o diâmetro dos poros (Baetens *et al.*, 2010) (Figura 4.24).

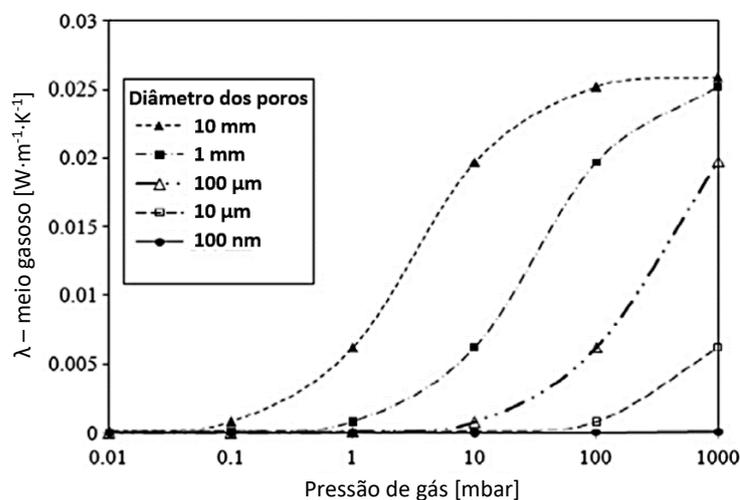


Figura 4.24 – Variação da condutibilidade térmica pelo meio gasoso em função do diâmetro dos poros e da pressão de gás (adaptada de Alam *et al.*, 2011).

Outro requisito imposto ao material do núcleo dos VIPs está relacionado com a resistência à compressão. O material utilizado deve possuir estabilidade suficiente para que os poros não

colapsem quando os painéis são evacuados. Por último, de maneira a reduzir a transferência de calor por radiação, o material do núcleo deve ser o mais possível opaco à radiação infravermelha. Devido às excelentes propriedades exibidas, a sílica de fumo é o material utilizado com maior frequência no núcleo dos VIPs. Uma das propriedades mais importantes da sílica de fumo para o desempenho térmico dos VIPs é o baixo valor do coeficiente de condutibilidade térmica verificado para diferentes níveis de pressão do meio gasoso. Este material possui, em condições secas, um valor do coeficiente de condutibilidade térmica próximo de $0,003 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ para pressões do meio gasoso até 50 mbar, e atinge o valor de $0,020 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ à pressão atmosférica (Figura 4.25). A sílica de fumo apresenta valores de porosidade acima dos 90% e a sua estrutura porosa é aberta, tendo os poros um diâmetro máximo de 300 nm. Os produtos de sílica de fumo comercializados apresentam, geralmente, valores de massa volumica e de área superficial específica entre 160 e $220 \text{ kg}/\text{m}^3$, e entre 100 e $400 \text{ m}^2/\text{g}$, respetivamente. O valor médio do calor específico da sílica de fumo é igual a $850 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ (Baetens *et al.*, 2010).

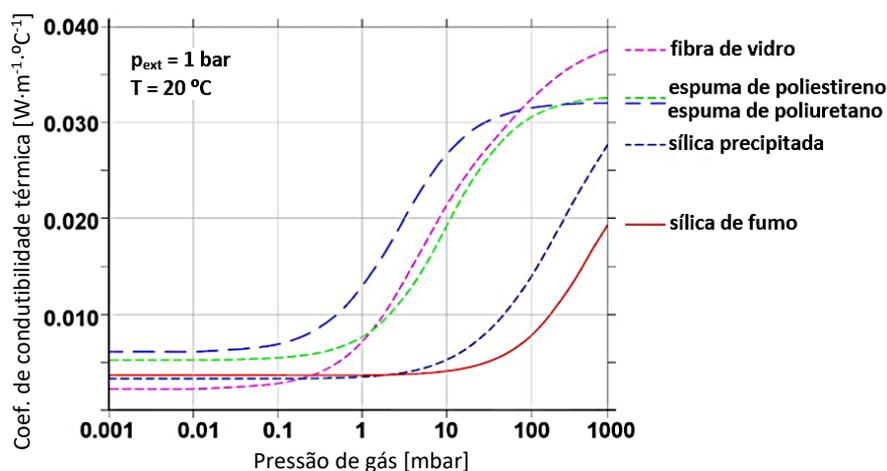


Figura 4.25 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica de vários materiais de isolamento em função da pressão de gás (Baetens *et al.*, 2010).

Por sua vez, o invólucro dos VIPs trata-se de um componente de extrema importância para o desempenho global desta solução, na medida em que é responsável por impedir a entrada de ar e de água para o interior do painel. Para além disso, o invólucro proporciona resistência mecânica para suportar eventuais tensões aplicadas durante o transporte, instalação e o período de operação. Tipicamente, os invólucros dos VIPs apresentam uma estrutura constituída por três camadas de material: i) a camada protetora; ii) a camada de barreira; e iii) a camada de selagem (Figura 4.23). A camada protetora é a camada exterior do invólucro dos VIPs. Esta camada protege o painel de tensões que possam surgir e funciona como substrato para a camada de barreira. Geralmente, o material utilizado para constituir a camada protetora é o polímero

termoplástico polietileno tereftalato (PET). Por sua vez, a camada de barreira, situada numa posição intermédia na estrutura do invólucro, funciona como barreira contra a entrada de ar e vapor de água para o interior dos VIPs. Este elemento do invólucro é, normalmente, constituído por folhas de alumínio ou camadas metalizadas de polímeros ligadas a um substrato polimérico de polipropileno (PP) ou polietileno tereftalato (PET). Por fim, a camada de selagem tem como principal função selar o material do núcleo ao invólucro. Esta camada situa-se no lado interno do painel e é, convencionalmente, composta por polietileno de baixa densidade (PEBD) ou por polietileno de alta densidade (PEAD) (Alam *et al.*, 2011).

Componentes adicionais como os absorventes, dessecantes e opacificadores são colocados no interior do núcleo dos VIPs e têm como objetivo aumentar o tempo de vida útil da solução. De forma contínua, os absorventes e os dessecantes absorvem vapor de água e gases, respetivamente, que possam existir no interior dos painéis ao longo do tempo de vida útil dos VIPs, provenientes do ambiente exterior ou libertados pelos materiais do núcleo e do invólucro. Os opacificadores, por sua vez, têm como finalidade reduzir as transferências de calor por radiação do material do núcleo, tornando-o opaco à radiação infravermelha (Alam *et al.*, 2011).

A grande mais valia da utilização dos VIPs em edifícios como solução de isolamento térmico é o seu coeficiente de condutibilidade térmica extremamente baixo. Em perfeitas condições, os VIPs apresentam valores do coeficiente de condutibilidade térmica entre 3 e 4 mW/(m·K) (Jelle, 2011), permitindo que a espessura necessária para atingir um determinado valor do coeficiente de transmissão térmica (U) de um elemento construtivo seja muito inferior em comparação com a utilização de materiais de isolamento térmico convencionais (Figura 4.26).

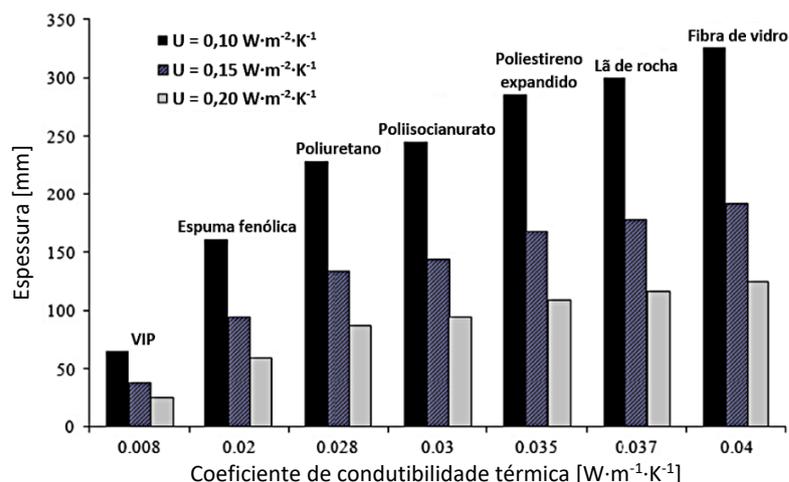


Figura 4.26 – Espessuras de diferentes isolamentos térmicos necessárias para alcançar determinados valores de U , considerando uma parede de alvenaria típica com um valor U de $0,53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$ (adaptada de Alam *et al.*, 2011).

Consequentemente, a utilização de VIPs possibilita aumentar a área útil de pavimento através da construção de envolventes com menor espessura e trata-se de uma solução eficaz para a realização de operações de reabilitação e de reconstrução de edifícios existentes, onde o espaço disponível para executar este tipo de intervenções é, na grande maioria das vezes, bastante limitado. A reação ao fogo é outro ponto favorável dos VIPs. Esta solução, de acordo com o sistema de classificação definido pela norma europeia EN 13501, pertence à classe A1 (categoria de reação ao fogo mais favorável) (Schiavoni *et al.*, 2016).

Relativamente ao desempenho acústico, de forma a melhorar as propriedades acústicas dos VIPs, estes são, geralmente, integrados em elementos de sanduíche que aumentam o valor da massa por unidade de superfície (Baetens *et al.*, 2010). Na Figura 4.27 apresentam-se, em função da frequência de onda, os valores do índice de redução sonora (R) de elementos de sanduíche com VIPs de massa superficial igual a 15 kg/m^2 , e do coeficiente de absorção sonora (α) de um VIP em condições de vácuo. Para além disso, esta solução é praticamente impermeável ao vapor de água, apresentando valores do fator de resistência ao vapor de água superiores a 340000 (Schiavoni *et al.*, 2016).

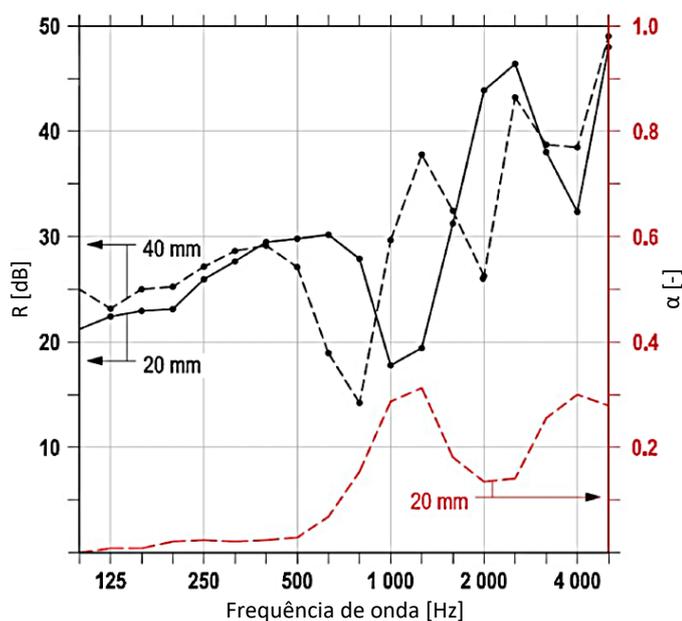


Figura 4.27 – Variação do coeficiente de absorção sonora α e da redução sonora R de elementos de sanduíche com VIPs de massa superficial igual a 15 kg/m^2 em função da frequência de onda (adaptada de Baetens *et al.*, 2010).

Atualmente, comparativamente com materiais de isolamento convencionais, os VIPs apresentam um custo de aquisição elevado (Aditya *et al.*, 2017). Para atingir o mesmo valor do

coeficiente de transmissão térmica (U) de um elemento construtivo, o custo, por m^2 , dos VIPs pode ser 10 vezes maior que o custo de materiais de isolamento convencionais. No entanto, a aplicação de VIPs como solução de isolamento térmico ao invés de materiais de isolamento térmico tradicionais pode significar a obtenção de potenciais benefícios monetários. A construção de envolventes de menor espessura quando se recorre à aplicação de VIPs como material de isolamento térmico permite aumentar a área útil do pavimento e, como tal, conduz a uma valorização do imóvel. Para determinados valores de mercado do metro quadrado de área útil, a valorização do imóvel que advém do aumento da área útil de pavimento quando se aplica VIPs pode mesmo superar o custo de aquisição dessa solução e resultar, nessa situação, na obtenção de potenciais lucros. Num estudo realizado por Jelle (Jelle, 2011) avaliou-se o valor dos potenciais benefícios monetários, em função dos valores de mercado do metro quadrado de área útil, resultantes da redução de espessura das paredes de um edifício com dimensões do pavimento de 10 m por 10 m e um pé direito igual a 2,5 m, proporcionada pela aplicação de VIPs. Com base nos resultados obtidos, verifica-se que, considerando uma redução da espessura da parede igual a 20 cm obtida a partir da substituição de lã mineral com um custo de 20€/m^2 por VIPs com um custo de 200€/m^2 , é possível obter lucros para valores de mercado do metro quadrado de área útil acima dos 2300€ (Figura 4.28).

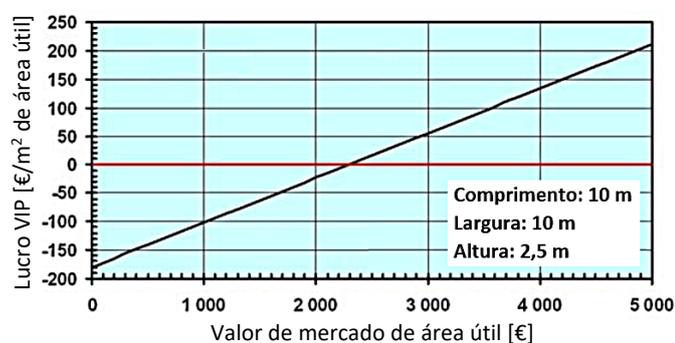


Figura 4.28 – Balanço monetário em função do valor de mercado de área útil, resultante da aplicação de VIPs em detrimento de lã mineral como material de isolamento térmico, considerando uma redução da espessura de parede igual a 20 cm (adaptada de Jelle, 2011).

Embora os VIPs sejam uma solução de isolamento térmico que oferece várias vantagens, das quais se destaca o valor do coeficiente de condutibilidade térmica extremamente baixo, existem alguns aspetos negativos que devem ser tidos em consideração. Um desses aspetos negativos é o aumento do coeficiente de condutibilidade térmica dos VIPs ao longo do tempo. A inevitável entrada, com o passar do tempo, de água e de ar através do invólucro provoca o aumento da pressão no interior dos painéis e, conseqüentemente, o coeficiente de condutibilidade térmica aumenta, limitando o tempo de vida útil desta solução (Jelle, 2011) (Figura 4.29).

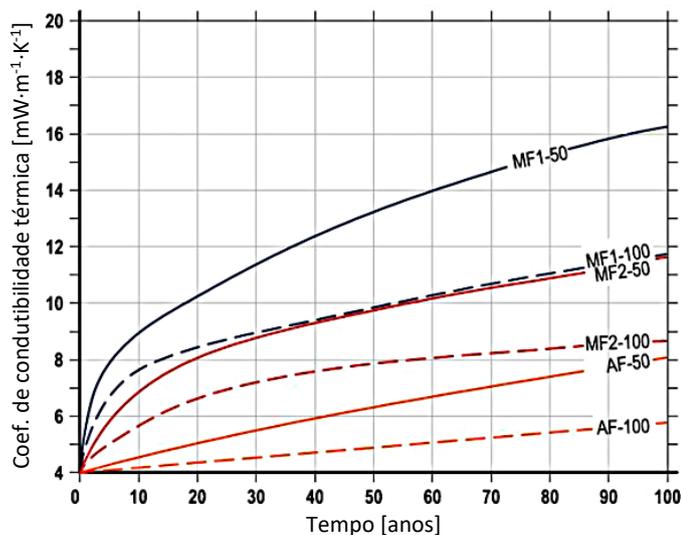


Figura 4.29 – Variação do coeficiente de condutibilidade térmica de VIPs com núcleo de sílica fumada em função do tempo de utilização dos painéis. Consideração de dois tamanhos diferentes de painéis (50 cm x 50 cm x 1 cm e 100 cm x 100 cm x 2 cm) e de três tipos diferentes de invólucros (AF, MF1 e MF2) (adaptada de Jelle, 2011).

Outra desvantagem associada aos VIPs é a sua elevada fragilidade. Quaisquer danos provocados no invólucro do painel podem fazer aumentar a pressão no interior dos painéis e, dessa maneira, provocar uma subida significativa do coeficiente de condutibilidade térmica, que pode atingir valores próximos de 20 mW/(m·K). Como tal, os painéis devem ser transportados e manuseados com grandes cuidados de forma a manter o invólucro intato. A impossibilidade de romper o invólucro sem que ocorram perdas elevadas do desempenho térmico está associada a outro aspeto negativo desta solução. Os VIPs não podem ser perfurados ou ajustados em local de obra e devem manter a configuração original de fabrico. A inflexibilidade desta solução obriga a que se tenha de recorrer à aplicação de outros materiais de isolamento térmico nas zonas onde os VIPs não possam ser colocados devido à sua geometria inalterável. Outra desvantagem da utilização dos VIPs como solução de isolamento térmico é o surgimento de pontes térmicas. O valor do coeficiente de condutibilidade térmica mais elevado na zona dos bordos dos painéis propicia a ocorrência de maiores fluxos de calor nesses locais e pode afetar substancialmente o desempenho global da solução (Jelle, 2011).

A produção do material do núcleo contribui para cerca de 90% da energia usada para o fabrico dos VIPs. Como tal, a utilização de materiais alternativos para o núcleo ou a aplicação de processos de produção desses materiais mais eficientes pode reduzir o impacto ambiental desta solução em cerca de 45% (Karami *et al.*, 2015). Num estudo realizado por Karami *et al.* (2015) comparou-se o impacto ambiental de três modelos de um edifício, um deles com um nível de

isolamento normal, e os outros dois com um nível de isolamento superior, dos quais num deles utilizou-se um material de isolamento convencional (lã mineral) e no outro recorreu-se à aplicação de VIPs. Analisando os resultados obtidos constata-se que os VIPs, comparativamente com a lã mineral, apresentam impactos ambientais negativos superiores nas categorias de Potencial de Aquecimento Global, Consumo de Energia Primária, Potencial de Acidificação e Potencial de Eutrofização, e exibe melhores resultados apenas na categoria de Potencial de Destruição da Camada de Ozono. Para além disso, considerando o efeito global ao nível do edifício pela aplicação de VIPs como solução de isolamento térmico, verifica-se que, comparativamente com o modelo de nível de isolamento normal, o modelo isolado com VIPs apresenta um aumento do consumo total de energia primária de cerca de 20%, enquanto que o potencial de aquecimento global é reduzido em 6% (Figura 4.30).

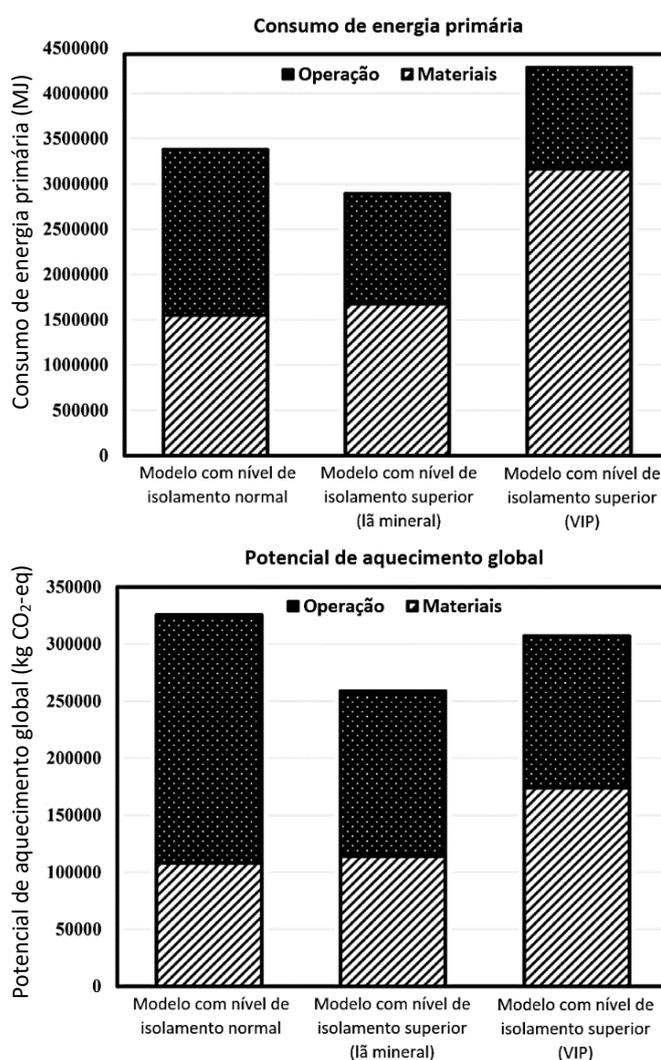


Figura 4.30 – Consumo de energia primária e potencial de aquecimento global associados aos três modelos analisados (adaptada de Karami *et al.*, 2015).

4.7 Principais vantagens e inconvenientes

No Quadro 4.6 apresentam-se, de forma resumida, as principais vantagens e inconvenientes dos materiais de isolamento térmico abordados anteriormente.

Quadro 4.6 – Principais vantagens e inconvenientes da lã de rocha, do poliestireno expandido, da fibra de celulose, da lã de ovelha, do aerogel e dos painéis de isolamento a vácuo.

Material de isolamento térmico	Vantagens	Inconvenientes
Lã de rocha	<ul style="list-style-type: none"> ● Adaptável ● Incombustível ● Suporta temperaturas elevadas ● Resistente a impactos biológicos, químicos e mecânicos ● Reutilizável ● Baixo custo ● Absorção sonora 	<ul style="list-style-type: none"> ● A presença de água ou a exposição a temperaturas elevadas, de forma prolongada, provoca a fragilização da resistência mecânica do material ● Aumento do coeficiente de condutibilidade térmica com o aumento da temperatura de operação e do teor de humidade ● Libertação de fibras/poeiras
Poliestireno expandido (EPS)	<ul style="list-style-type: none"> ● Leve ● Versátil ● Dimensionalmente estável ● Inerte ● Baixo custo ● Resistente à biodegradação ● Não tóxico ● Oferece resistência à compressão ● 100% reciclável ● Possibilidade de os painéis serem facilmente cortados, perfurados e ajustados no local de obra sem perder o seu desempenho térmico ● Fator de resistência à permeação ao vapor de água elevado 	<ul style="list-style-type: none"> ● Não apresenta qualquer propriedade acústica significativa ● Facilmente inflamável ● Liberta gases perigosos durante a sua queima
Fibra de celulose	<ul style="list-style-type: none"> ● Apresenta reduzidos impactos ambientais negativos ● Adequado para o preenchimento de cavidades 	<ul style="list-style-type: none"> ● Facilmente inflamável ● Propensão para o desenvolvimento de fungos
Lã de ovelha	<ul style="list-style-type: none"> ● Adaptável ● Natural ● Renovável ● Reciclável ● Reduzidos impactos ambientais negativos ● Sem potenciais riscos para a saúde humana ● Absorção sonora 	<ul style="list-style-type: none"> ● Aumento significativo do valor do coeficiente de condutibilidade térmica com o aumento do teor de humidade (principalmente acima dos 20 %) e da temperatura de operação

Material de isolamento térmico	Vantagens	Inconvenientes
Aerogel	<ul style="list-style-type: none"> • Valores do coeficiente de condutibilidade térmica muito baixos. (15 mW/(m·K)) • Material translúcido • Isolamento sonoro a sons aéreos • Não inflamável • Capacidade de filtrar vários contaminantes presentes no ar • Ocupação de pouco espaço, o que possibilita diminuir a espessura da envolvente • Adequado para a realização de operações de reabilitação ou reconstrução de edifícios existentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa resistência mecânica • Possível presença de sílica cristalina, necessitando de cuidados específicos no seu manuseamento e instalação • Custo elevado
Painéis de isolamento a vácuo (VIP)	<ul style="list-style-type: none"> • Valores do coeficiente de condutibilidade térmica extremamente baixos (7 mW/(m·K)) • Ocupação de pouco espaço, o que possibilita diminuir a espessura da envolvente • Adequado para a realização de operações de reabilitação ou reconstrução de edifícios existentes • Bom desempenho relativamente à reação ao fogo 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento do coeficiente de condutibilidade térmica ao longo do tempo • Tempo de vida útil limitado, obrigando à substituição dos painéis após determinado tempo de utilização • Elevada fragilidade • Impossibilidade de perfurar ou cortar os painéis • Existência de pontes térmicas na zona dos bordos do invólucro • Custo elevado

4.8 Análise comparativa

Nesta secção é realizada uma análise comparativa entre as principais propriedades dos materiais de isolamento referidos nas secções anteriores e de outros materiais existentes no mercado, organizados em “materiais orgânicos”, “materiais inorgânicos e “materiais inovadores”, segundo a classificação proposta por Papadopoulos (2005). Na Figura 4.31 encontram-se os valores mínimos, máximos e médios do coeficiente de condutibilidade térmica de dezoito materiais de isolamento térmico. Para além disso, no Quadro 4.7 apresenta-se a caracterização dos materiais em relação às seguintes propriedades: i) massa volúmica, ii) calor específico, iii) energia incorporada, iv) potencial de aquecimento global, v) classificação ao fogo, e vi) permeabilidade ao vapor de água.

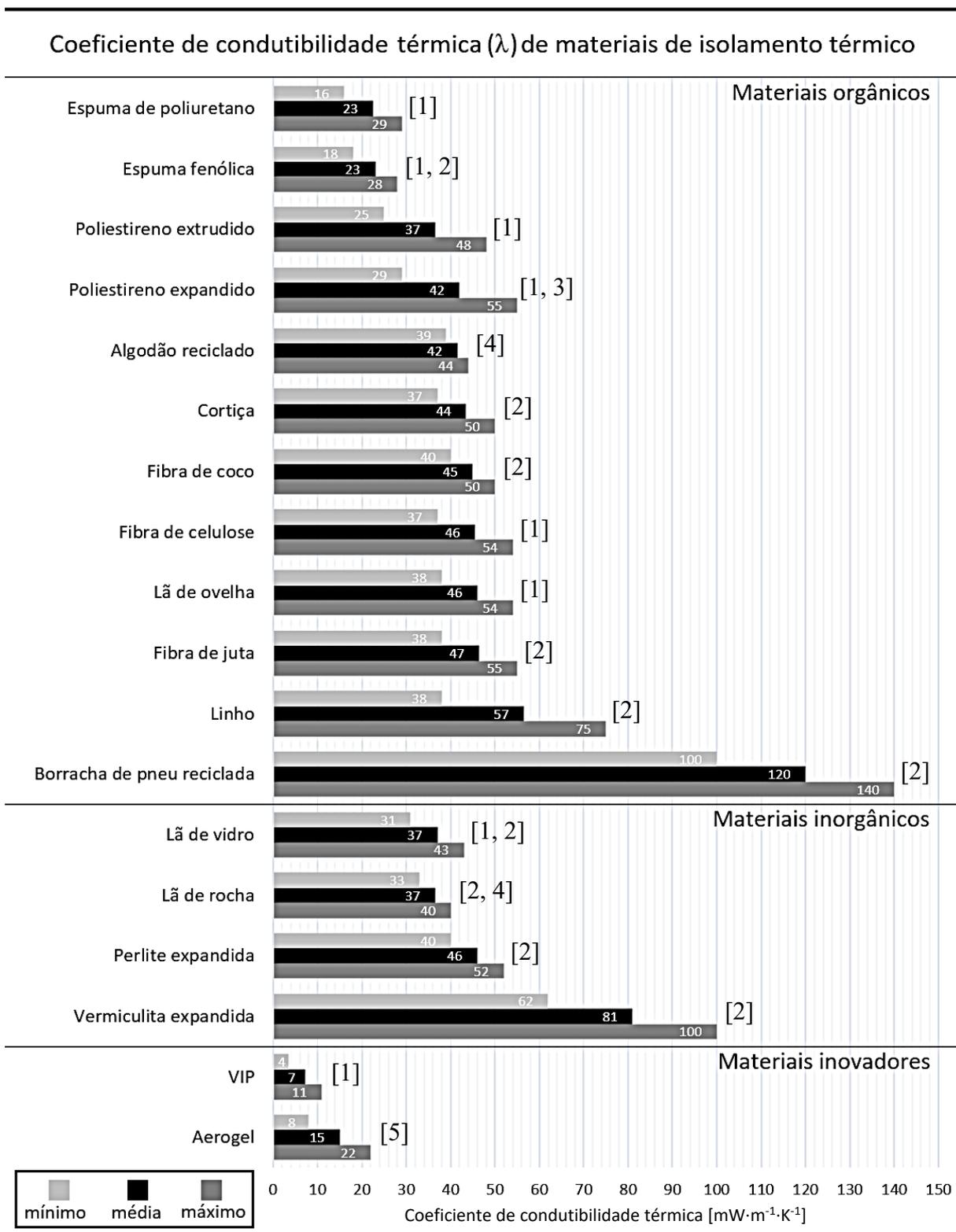


Figura 4.31 – Coeficiente de condutibilidade térmica de materiais de isolamento térmico existentes no mercado.

Quadro 4.7 – Outras propriedades de materiais de isolamento térmico existentes no mercado.

Material	Massa volúmica [kg/m ³]	Calor específico [kJ/(kg·K)]	Energia incorporada	Potencial de aquec. global [kgCO ₂ eq/(u.f.)]	Classificação ao fogo	Valor-μ
Materiais orgânicos						
Espuma de poliuretano	40-55 [1]	1,30-1,45 [2]	1125 kWh/m ³ [3]	6,79 [7]	E [2]	30-170 [2]
Espuma fenólica	40-160 [2]	1,30-1,40 [2]	-	17,06 [9]	B-C [2]	35 [2]
Poliestireno extrudido	26-45 [1]	1,30-1,70 [2, 4]	1125 kWh/m ³ [3]	13,22 [4]	E [2, 4]	80-150 [2]
Poliestireno expandido	15-35 [1, 2, 4]	1,25-1,30 [2, 4]	1125 kWh/m ³ [3]	8,25 [2]	E [2, 4]	20-70 [2]
Algodão reciclado	25-45 [4]	1,6 [4]	-	-	E [4]	-
Cortiça	110-170 [2]	1,50-1,70 [2]	26,3 MJ/kg [1]	5,72-5,93 [2]	E [2]	5-30 [2]
Fibra de coco	50-160 [2]	1,30-1,70 [2]	250 kWh/m ³ [3]	-	-	-
Fibra de celulose	24-80 [1, 2]	1,30-1,60 [2]	133 kWh/m ³ [3]	1,83 [7]	B-C-E [2]	1,7-3,0 [2]
Lã de ovelha	10-25 [2, 4]	1,30-1,70 [2, 4]	30 kWh/m ³ [3]	1,46 [4]	B1-B2 [4]	1,0-3,0 [2]
Fibra de juta	35-100 [2]	2,30-2,35 [2]	-	2,79 [2]	E [2]	1-2 [2]
Linho	20-100 [2]	1,40-1,60 [2]	39,5 MJ/kg [7]	-	E [2]	1,0-3,0 [2]
Borracha de pneu reciclada	500-930 [2]	-	-	-	D-E [2]	14 [2]
Materiais inorgânicos						
Lã de vidro	10-80 [3]	0,90-1,00 [2]	39,4 MJ/kg [1]	9,89 [2]	A1-A2 [2]	1,0-1,1 [2]
Lã de rocha	32-200 [1, 2, 4]	0,80-1,00 [2, 4]	16,8 MJ/kg [7]	1,40-2,80 [4]	A1-A2 [2, 4]	1,0-1,3 [2]
Perlite expandida	80-150 [2]	0,90-1,00 [2]	80 MJ/(u.f.) [8]	3,99 [2]	A1 [2]	2,0-3,0 [2]
Vermiculita expandida	30-150 [2]	0,80-1,10 [2]	100 MJ/(u.f.) [8]	3,36 [2]	A1 [2]	2,0-3,0 [2]
Materiais inovadores						
VIP	160-230 [2]	0,8 [2]	-	-	A1 [2]	≥ 340000 [2]
Aerogel	70-150 [2, 5, 6]	1 [2]	53 MJ/kg [1]	-	C [2]	5,0-5,5 [2]

Identificação das referências numéricas

[1] Cuce *et al.* (2016); [2] Schiavoni *et al.* (2016); [3] Aditya *et al.* (2017); [4] Asdrubali *et al.* (2015); [5] Baetens *et al.* (2011); [6] Sun *et al.* (2018); [7] Hurtado *et al.* (2016); [8] Asdrubali (2009); [9] Densley *et al.* (2013).

Através da caracterização dos materiais de isolamento térmico realizada é possível identificar os principais aspetos positivos e negativos de cada um e as respetivas potencialidades para a aplicação no sistema construtivo em LSF. O material de isolamento térmico mais adequado para aplicação numa determinada construção é aquele que, para além de satisfazer os requisitos ao nível do comportamento térmico, também permite alcançar o desempenho acústico desejado, proporciona proteção contra incêndios e apresenta impactos ambientais negativos o mais

reduzidos possível, tendo simultaneamente, um custo acessível. No entanto, uma vez que na prática torna-se difícil conciliar um comportamento positivo em todas essas vertentes, o material de isolamento térmico a aplicar numa construção deve ser aquele que consegue alcançar o melhor desempenho possível tendo em conta uma apreciação global do mesmo relativamente aos fatores referidos.

Dos materiais analisados, verifica-se que os valores do coeficiente de condutibilidade térmica mais baixos correspondem, por larga margem, aos aerogéis ($15 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) e aos VIPs ($7 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Estes dois materiais, tal como referido anteriormente, proporcionam um desempenho térmico extremamente elevado quando comparado com o desempenho de materiais de isolamento tradicionais. A lã de rocha e o poliestireno expandido (EPS), tipicamente utilizados na construção em LSF, apresentam valores do coeficiente de condutibilidade térmica de $37 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ e de $42 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, respetivamente. De referir ainda que o poliestireno extrudido (XPS), como material de isolamento rígido com valores do coeficiente de condutibilidade térmica de cerca de $37 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, proporciona uma resistência mecânica superior ao EPS e pode ser utilizado como material de isolamento em lajes de pavimento ou de cobertura.

No âmbito do desempenho acústico, materiais fibrosos, como a lã de rocha ou a lã de ovelha, podem ser usados como absorventes acústicos devido aos elevados coeficientes de absorção sonora que proporcionam. Outro material com propriedades acústicas favoráveis é a cortiça. A cortiça para além de ser um bom absorvente sonoro, pode também ser usada como material isolante relativamente a sons de percussão (Asdrubali *et al.*, 2012).

Em relação à reação ao fogo, os dados apresentados indicam que os materiais inorgânicos apresentam o melhor desempenho. A perlite expandida e a vermiculita expandida pertencem à classe de melhor desempenho de acordo com o sistema de classificação definido pela norma europeia EN 13501-1 (classe A1), enquanto que a lã de rocha e a lã de vidro podem inserir-se nas classes A1 ou A2. Outro material que também pertence à classe de melhor desempenho são os painéis de isolamento a vácuo (VIPs). No lado oposto, é possível constatar que materiais de isolamento como o poliestireno expandido (EPS), o poliestireno extrudido (XPS) ou a cortiça pertencem à classe de pior desempenho no que respeita à reação ao fogo (classe E).

Considerando os impactos ambientais envolvidos em cada material de isolamento térmico, constata-se que os materiais fibrosos naturais de origem vegetal ou animal, como o algodão, a fibra de coco ou a lã de ovelha, apresentam impactos negativos menores, considerando os valores de energia incorporada e de potencial de aquecimento global. De salientar ainda que, entre os materiais analisados, a lã de rocha é o material, por unidade funcional, com o valor de potencial de aquecimento global mais reduzido ($1,40 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$).

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal da presente dissertação foi realizar uma revisão do estado-da-arte sobre materiais de isolamento térmico para aplicação no sistema construtivo em LSF. Neste trabalho efetuou-se, numa primeira parte, uma descrição geral da construção em LSF, das suas principais vantagens e desvantagens, do seu desempenho térmico e do modo como os materiais de isolamento térmico influenciam o comportamento térmico deste tipo de construção. Numa segunda parte, procedeu-se à identificação, caracterização e apresentação das vantagens e inconvenientes de materiais de isolamento térmico com potencialidades para serem aplicados neste sistema construtivo e melhorarem o seu desempenho térmico. Os materiais de isolamento térmico escolhidos para realizar uma análise mais detalhada foram a lã de rocha e o EPS, uma vez que são os materiais tipicamente utilizados neste sistema construtivo, as fibras de celulose e a lã de ovelha e, como soluções de isolamento alternativas, e o aerogel e os VIPs, como materiais mais recentes e inovadores, e com desempenhos térmicos superiores comparativamente com os materiais de isolamento térmico convencionais. Para além dos materiais referidos, na parte final da dissertação incluiu-se, de forma resumida, a identificação, caracterização e comparação de um conjunto de outros materiais de isolamento térmico existentes no mercado.

A lã de rocha, tipicamente utilizada no sistema construtivo em LSF no interior das paredes, entre os perfis metálicos, é uma solução de isolamento térmico que apresenta um conjunto de qualidades que a tornam bastante adequada para a utilização neste tipo de construção. A sua adaptabilidade, por ser um material fibroso, permite que seja aplicada no interior das paredes da construção em LSF e que se adapte, facilmente, à geometria da estrutura metálica. Para além disso, a lã de rocha apresenta um custo reduzido, é reutilizável, oferece resistência a ataques biológicos, químicos e mecânicos e é incombustível. Os dois pontos mais desfavoráveis deste material são a fragilização da sua resistência mecânica devido à presença de água ou à exposição a temperaturas elevadas, de forma prolongada, e o aumento do coeficiente de condutibilidade térmica com o aumento da temperatura de operação e do teor de humidade.

Por sua vez, o poliestireno expandido (EPS) é, frequentemente, utilizado integrado no sistema ETICS quando se opta pela colocação de isolamento térmico contínuo pelo exterior na construção em LSF. O EPS pode ser cortado, perfurado e ajustado sem perder o seu desempenho térmico, tornando possível isolar de forma eficaz, pelo exterior, todas as paredes de fachada da construção. Este material apresenta um custo reduzido, é leve, resiste à biodegradação e é 100% reciclável. Um dos pontos negativos mais relevantes neste material é o facto de ser facilmente inflamável.

As fibras de celulose, sendo um material de isolamento geralmente comercializado sob a forma de fibras soltas aplicadas por projeção e eficaz no preenchimento de cavidades, pode ser uma alternativa viável à lã de rocha como solução de isolamento no interior das paredes do sistema construtivo em LSF. Para além disso, as fibras de celulose apresentam reduzidos impactos ambientais negativos. Os principais pontos negativos associados a este material são a sua elevada inflamabilidade e a propensão para o desenvolvimento de fungos.

Outro material que pode ser utilizado como alternativa à lã de rocha como material de isolamento térmico no interior das paredes da construção em LSF é a lã de ovelha. A lã de ovelha, para além de ser adaptável, trata-se também de um material natural, renovável, reciclável, com reduzidos impactos ambientais negativos e não apresenta potenciais riscos para a saúde humana. O principal ponto negativo deste material é o aumento significativo do coeficiente de condutibilidade térmica com o aumento do teor de humidade e da temperatura de operação.

Um dos mais promissores materiais de isolamento térmico para aplicação em edifícios é o aerogel. Comparativamente com materiais de isolamento térmico convencionais, o aerogel apresenta valores do coeficiente de condutibilidade térmica muito baixos (cerca de $15 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), possibilitando a utilização de espessuras de isolamento mais reduzidas e, consequentemente, ocupando menos espaço e permitindo que a espessura da envolvente possa ser menor. Para além disso, o aerogel é um material translúcido, podendo ser usado em fachadas ou coberturas com aproveitamento de luz natural. O principal aspeto negativo, e que condiciona a comercialização em larga escala deste material, é o seu elevado custo quando comparado com o custo de outros materiais de isolamento convencionais existentes no mercado. No sistema construtivo em LSF, este material é, por vezes, utilizado em tiras de corte térmico para reduzir o efeito das pontes térmicas originadas pelos perfis de aço. Dadas as excelentes propriedades oferecidas por este material de isolamento térmico, a sua utilização na construção em LSF deve ser melhor explorada com vista a encontrar aplicações viáveis que possam aperfeiçoar o desempenho térmico deste tipo de construções.

Outra solução de isolamento térmico inovadora e que pode proporcionar desempenhos térmicos elevados são os painéis de isolamento a vácuo (VIPs). À semelhança do aerogel, os valores do coeficiente de condutibilidade térmica extremamente baixos dos VIPs (cerca de $7 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) quando comparados com os valores de materiais de isolamento térmico convencionais, permite que estes painéis proporcionem desempenhos térmicos elevados com espessuras bastante reduzidas. No entanto, apesar do desempenho térmico elevado, os VIPs apresentam vários pontos negativos que podem condicionar a sua aplicação nas construções. Os VIPs são bastante frágeis e não é possível perfurar ou cortar os painéis sem que se perca grande parte do desempenho térmico. Outro aspeto negativo é a inevitável entrada de água e de ar através do

invólucro ao longo do tempo, provocando o aumento do coeficiente de condutibilidade térmica e fazendo com que o seu tempo de vida útil seja. Para além disso, os VIPs apresentam um custo elevado comparativamente com o custo de materiais de isolamento convencionais. A possibilidade de utilizar este material de isolamento térmico nas construções em LSF ainda foi pouco explorada. No entanto, uma possível incorporação dos VIPs num sistema de isolamento pelo exterior semelhante ao ETICS, solucionados os aspetos negativos relativos à sua fragilidade e impossibilidade de serem perfurados ou cortados, pode constituir uma importante solução para melhorar o desempenho térmico do sistema construtivo em LSF.

Para além dos materiais referidos neste trabalho, outros materiais de isolamento térmico apresentam também, certamente, potencialidades para serem aplicados no sistema construtivo em LSF. Com o objetivo de melhorar a qualidade deste tipo de construção, torna-se importante descobrir, estudar e testar novas soluções de isolamento térmico compatíveis com as particularidades deste sistema construtivo e que tenham a capacidade de aperfeiçoar o seu comportamento térmico e a sua eficiência energética, aliando também, sempre que possível, um desempenho favorável em termos acústicos, de resistência ao fogo e de impactos ambientais.

Finalizando, conclui-se com esta dissertação que os materiais de isolamento térmico apresentam uma importância capital no desempenho térmico e energético das construções em LSF. A escolha dos materiais de isolamento térmico mais adequados e a sua correta aplicação permite aumentar a resistência térmica das envolventes, minimizar o efeito negativo das pontes térmicas e, conseqüentemente, diminuir as necessidades energéticas para alcançar o conforto térmico dos espaços interiores. Para além disso, a utilização de materiais de isolamento que apresentem um desempenho superior, não apenas termicamente, mas também ao nível da acústica, do comportamento ao fogo e dos aspetos ambientais, pode tornar a construção em LSF ainda mais competitiva e sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdou, A., Budaiwi, I. (2005). “Comparison of thermal conductivity measurements of building insulation materials under various operating temperatures”. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, Vol. 29, Issue 2, pp. 171-184.

Aditya, L., Mahlia, T. M. I., Rismanchi, B., Ng, H. M., Hasane, M. H., Metselaar, H. S. C., Muraza, O., Aditya, H. B. (2017). “A review on insulation materials for energy conservation in buildings”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 73, Issue 1, pp. 1352-1365.

Agham, D. (2012). “State-of-the-art insulation materials: a review”. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, Vol. 2, Issue 6, pp. 97-102.

Alam, M., Singh, H., Limbachiya, M. (2011). “Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions”. *Applied Energy*, Vol. 88, Issue 11, pp. 3592-3602.

Asdrubali, F. (2009). “The role of Life Cycle Assessment (LCA) in the design of sustainable buildings : thermal and sound insulating materials”. *Conference Paper*, October, 2009.

Asdrubali, F., Schiavoni, S., Horoshenkov, K. (2012). “A review of sustainable materials for acoustic applications”. *Building Acoustics*, Vol. 19, Issue 4, pp. 283-312.

Asdrubali, F., D’Alessandro, F., Schiavoni, S. (2015). “A review of unconventional sustainable building insulation materials”. *Sustainable Materials and Technologies*, Vol. 4, Issue 1, pp. 1-17.

ASTM C177. “Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus”. *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, United States of America.

ASTM C303. “Standard Test Method for Dimensions and Density of Preformed Block and Board-Type Thermal Insulation”. *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, United States of America.

ASTM C423-09a. “Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method”. *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, United States of America.

ASTM C518. “Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus”. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, United States of America.

ASTM E1269. “Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry”. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, United States of America.

Atsonios, I. A., Mandilaras, I. D., Kontogeorgos, D. A., Founti, M. A. (2018). “Two new methods for the in-situ measurement of the overall thermal transmittance of cold frame lightweight steel-framed walls”. *Energy and Buildings*, Vol. 170, pp. 183–194.

Baetens, R., Jelle, B., Thue, J., Tenpierik, M., Grynning, S., Uvsløkk, S., Gustavsen, A. (2010). “Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond”. *Energy and Buildings*, Vol. 42, Issue 2, pp. 147-172.

Baetens, R., Jelle, B., Gustavsen, A. (2011). “Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review”. *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 761-769.

Ballagh, K. (1996). “Acoustical properties of wool”. *Applied Acoustics*, Vol. 48, Issue 2, pp. 101-120.

Belakroum, R., Gherfi, A., Kadja, M., Maalouf, C., Lachi, M., El Wakil, N., Mai, T. H. (2018). “Design and properties of a new sustainable construction material based on date palm fibers and lime”. *Construction and Building Materials*, Vol. 184, Issue 1, pp. 330-343.

Build It (2020). <https://www.self-build.co.uk/choosing-natural-insulation/>. Consultado a 3 de maio de 2020.

Calbureanu, M., Albota, E., Tutunea, D., Dumitru, S., Malciu, R., Dima, A. (2010). “Contributions above the dew-point problem in civil building EPS insulated walls modeling with finite element the convective heat transfer”. *International Journal of Mechanics*, Vol. 4, Issue 3, pp. 53-62.

Cuce, E., Cuce, P., Wood, C., Riffat, S. (2014). “Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 34, pp. 273-299.

DDN (2020). https://www.ddn-eng.com/br/vanguarda_detalle/isolamento-termico-sustentavel-utilizando-papel-reciclado/. Consultado a 27 de abril de 2020.

Densley, D., Hathway, A., Davison, B. (2013). “BIG Energy Upgrade: Environmental burden of insulation materials for whole building performance evaluation”. The University of Sheffield, 2013.

EN 10326 (2004). “Continuously hot-dip coated strip and sheet of structural steels. Technical delivery conditions”. European Committee for Standardization, Europe.

EN 12664 (2001). “Thermal Performance of Building Materials and Products - Determination of Thermal Resistance by Means of Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methods - Dry and Moist Products of Medium and Low Thermal Resistance”. European Committee for Standardization, Europe.

EN 12667 (2001). “Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Products of high and medium thermal resistance”. European Committee for Standardization, Europe.

EN 12939 (2001). “Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Thick products of high and medium thermal resistance”. European Committee for Standardization, Europe.

EN 13501-1. “Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests”. European Committee for Standardization, Europe.

EN 1602 (2013). “Thermal insulating products for building applications. Determination of the apparent density”. European Committee for Standardization, Europe.

EN 1993 (2004). “Eurocode 3 – Design of steel structures”. European Committee for Standardization, Europe.

Epicentro (2020). <https://www.grupoepicentro.com/isocell-isolamento-termico/>. Consultado a 27 de abril de 2020.

Erhorn-Klutting, H., Erhorn, H. (2009). “Impact of thermal bridges on the energy performance of buildings”. ASIEPI P148.

European Commission (2016). “EU Reference Scenario 2016 – Energy, transport and GHG emissions; Trends to 2050”. European Commission.

Forte EPS Solutions (2020). <http://www.forte-eps-solutions.com/styrofoam-sheets-polystyrene-insulation-difference-new-jersey-new-york-ontario-quebec.html>. Consultado a 15 de abril de 2020.

Futureng (2020a). <http://www.futureng.pt/lfsf>. Consultado a 7 de abril de 2020.

Futureng (2020b). <http://www.futureng.pt/gesso-laminado>. Consultado a 7 de abril de 2020.

Gnip, I., Vėjelis, S., Vaitkus, S. (2012). “Thermal conductivity of expanded polystyrene (EPS) at 10 °C and its conversion to temperatures within interval from 0 to 50 °C”. *Energy and Buildings*, Vol. 52, pp. 107-111.

Green Building Advisor (2020). <https://www.greenbuildingadvisor.com/green-basics/batt-and-blanket-insulation>. Consultado a 15 de abril de 2020.

Green Building Advisor (2020b). <https://www.greenbuildingadvisor.com/article/does-vacuum-insulation-make-sense>. Consultado a 20 de maio de 2020.

Grubb, P., Gergolewski, M., Lawson, R., (2001). “Building Design using Cold Formed Steel Sections – Light Steel Framing in Residential Construction”. The Steel Construction Institute, SCI Publication P301.

Hurtado, P., Rouilly, A., Vandebossche, V., Raynaud, C. (2016). “A review on the properties of cellulose fibre insulation”. *Building and Environment*, Vol. 96, pp. 170-177.

Insulation Corporation of America (2020). <https://insulationcorp.com/eps/>. Consultado a 24 de abril de 2020.

International Energy Agency (2020). <https://www.iea.org/>. Consultado a 5 de março de 2020.

ISO 10140 (2010). “Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 10534-2 (1998). “Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 11357. “Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC)”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 12354-1 (2017). “Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1: Airborne sound insulation between rooms”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 12354-2 (2017). “Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 2: Impact sound insulation between rooms”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 16283-1 (2014). “Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 16283-2 (2018). “Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 2: Impact sound insulation”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 22007-1 (2017). “Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 1: General principles”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 22007-2 (2015). “Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 22007-3 (2008). “Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 3: Temperature wave analysis method”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 22007-4 (2017). “Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 4: Laser flash method”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 354 (2003). “Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 717-1 (2013). “Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 717-2 (2013) “Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 2: Impact sound insulation”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 8990 (1994). “Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties -Calibrated and guarded hot box”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 9052-1 (1989). “Acoustics - Determination of dynamic stiffness - Part 1: Materials used under floating floors in dwellings”. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

Jelle, B. (2011). “Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities”. *Energy and Buildings*, Vol. 43, Issue 10, pp. 2549-2563.

Jerman, M., Černý, R. (2012). “Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials”. *Energy and Buildings*, Vol. 53, pp. 39-46.

Kalwall (2020). https://www.kalwall.com/wp-content/uploads/2015/08/kalwall-skyroofs-brochure_2020-v2.pdf. Consultado a 12 de maio de 2020.

Karamanos, A., Hاديarakou, S., Papadopoulos, A. (2008). “The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool”. *Energy and Buildings*, Vol. 40, Issue 8, pp. 1402-1411.

Karami, P., Al-Ayish, N., Gudmundsson, K. (2015). “A comparative study of the environmental impact of Swedish residential buildings with vacuum insulation panels”. *Energy and Buildings*, Vol. 109, pp. 183-194.

Koebel, M., Rigacci, A., Achard, P. (2012). “Aerogel-based thermal superinsulation: an overview”. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, Vol. 63, Issue 1, pp. 315-339.

Lakatos, A., Kalmár, F. (2013). “Analysis of water sorption and thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials”. *Building Services Engineering Research and Technology*, Vol. 34, Issue 4, pp. 407-416.

LSK (2005). “European Lightweight Steel-framed Construction”. European Lightweight Steel-framed Association (LSK) and Arcelor, Luxemburg.

Martins, C., Santos, P., Simões da Silva, L. (2016). “Lightweight steel-framed thermal bridges mitigation strategies: a parametric study”. *Journal of Building Physics*, Vol. 39, Issue 4, pp. 342-372.

NASA (2020). <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7456>. Consultado a 12 de maio de 2020.

Nuclear Power (2020). <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/heat-transfer/heat-losses/building-insulation-home-insulation/facade-insulation-external-wall-insulation/>. Consultado a 24 de abril de 2020.

Papadopoulos, A. (2005). “State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments”, *Energy and Buildings*, Vol. 37, Issue 1, pp. 77-86.

Patnaik, A., Mvubu, M., Muniyasamy, S., Botha, A., Anandjiwala, R. (2015). “Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies”. *Energy and Buildings*, Vol. 92, pp. 161-169.

Pereira A., Santos P. (2019). “State-of-the-art update – Part 2 – LSF Construction System”. Tyre4BuildIns Research Project, Department of Civil Engineering, University of Coimbra.

Perfisa (2020). <https://perfisa.pt/construcao-em-light-steel-framing/>. Consultado a 7 de abril de 2020.

Reichel Insulation (2020a). <http://www.reichelinsulation.com/SprayFoam-Insulation.html>. Consultado a 15 de abril de 2020.

Ricciardi, P., Gibiat, V., Hooley, A. (2002). “Multilayer absorbers of silica aerogel”. *Proceedings of Forum Acusticum, Sevilla, September, 2002*.

Roque, E., Santos P. (2017). “The effectiveness of Thermal Insulation in Lightweight Steel-Framed Walls with Respect to Its Position”. *Buildings*, Vol. 7, Issue 1.

Santos, P. (2017). “Chapter 3 - Energy Efficiency of Lightweight Steel-Framed Buildings”. Energy Efficient Buildings, InTech, Croatia.

Santos, P., Martins, C., Simões da Silva, L. (2014). “Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems”. Metallurgical Research and Technology, Vol. 111, pp. 329-338.

Santos, P., Simões da Silva, L., Ungureanu, V. (2012). “Energy Efficiency of Light-weight Steel-framed Buildings”. 1st ed., European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Technical Committee 14 - Sustainability & Eco-Efficiency of Steel Construction, ISBN 978-92-9147-105-8, N. 129.

Schiavoni, S., D’Alessandro, F., Bianchi, F. (2016). “Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 62, pp. 988-1011.

Schmidt, A., Jensen, A., Clausen, A., Kamstrup, O., Postlethwaite, D. (2004). “A comparative life cycle assessment of building insulation products made of stone wool, paper wool and flax”. Building Insulation Products, Vol. 9, Issue 2, pp. 122-129.

Schultz-Falk, V., Agersted, K., Arendt Jensen, P., Solvang, M. (2018). “Melting behaviour of raw materials and recycled stone wool waste”. Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 485, pp. 34-41.

Silvestre, N., Pires, J., Santos, A. (2013). "Manual de Conceção de Estruturas e Edifícios em LSF - Light Steel Framing". CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.

Simões, R. A. D. (2005). “Manual de dimensionamento de estruturas metálicas”. CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.

Soares, N., Santos, P., Gervásio, H., Costa, J. J., Simões da Silva, L. (2017). “Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 78, pp. 194-209.

Sun, Y., Wilson, R., Wu, Y. (2018). “A Review of Transparent Insulation Material (TIM) for building energy saving and daylight comfort”. Applied Energy, Vol. 226, Issue 1, pp. 713-729.

Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L., Amado Mendes, P. (2010). “Acústica Aplicada” (sebenta da unidade curricular de Acústica Aplicada do Mestrado Integrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil, FCTUC, Coimbra.

Thermal Engineering (2020). <https://www.thermal-engineering.org/author/matan/page/5/>. Consultado a 24 de abril de 2020.

Tye, R. P., Spinney, S. C. (1979). “A study of the effects of moisture vapour on the thermal transmittance characteristics of cellulose fibre thermal insulation”. *Journal of Building Physics*, Vol. 2, Issue 4, pp. 175-196.

Zabalza, I., Capilla, A., Usón, A. (2011). “Life Cycle Assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential”. *Building and Environment*, Vol. 46, Issue 5, pp. 1133-1140.

Zach, J., Korjenic, A., Petránek, V., Hroudová, J., Bednar, T. (2012). “Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool”. *Energy and Buildings*, Vol. 49, pp. 246-253.