**Universidade do Minho**
Escola de Engenharia

Bernardino Miguel Ferreira da Rocha

# Avaliação e seleção de materiais para assegurar o isolamento térmico e acústico de um sistema construtivo em painéis pré-fabricados de madeira

janeiro de 2025

**Universidade do Minho**
Escola de Engenharia

Bernardino Miguel Ferreira da Rocha

# Avaliação e seleção de materiais para assegurar o isolamento térmico e acústico de um sistema construtivo em painéis pré-fabricados de madeira

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
**Doutora Sandra Maria Gomes Monteiro da Silva**

janeiro de 2025

# DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.
Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.
Caso o utilizador necessite de permissão para poder usar o trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do Repositório UM da Universidade do Minho.

*Licença concedida aos utilizadores deste trabalho*



**Atribuição**
**CC BY**
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

## Agradecimentos

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Edifícios, na Universidade do Minho. Gostaria de expressar o meu profundo agradecimento e estima a todas as pessoas que colaboraram na sua elaboração, em particular às que refiro em seguida.

Em primeiro lugar agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Sandra M. Silva pela partilha de conhecimentos, pela sua orientação, troca de informações, esclarecimento de dúvidas, disponibilidade e generosidade ao longo do trabalho realizado.

À Marina Costa U. Tenório pela sua ajuda com a disponibilização de estudos que permitiram ter um maior conhecimento sobre o tema abordado, esclarecimento, disponibilidade e generosidade ao longo do trabalho realizado.

À minha mãe Maria da Conceição Rocha e ao meu pai Mário Rocha pelo suporte, incentivo e dedicação sem os quais não conseguiria concluir este capítulo da minha formação com sucesso.

Aos meus irmãos Mário Rocha e Filipe Rocha pelo apoio dado durante todo o período de redação da dissertação.

Aos meus colegas do Mestrado em Engenharia Civil que partilharam comigo esta jornada tornando-a mais divertida, saudável e memorável.

*" A persistência é o caminho do êxito."*

*Charles Chaplin*

## Declaração de Integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações, ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## Resumo

A eficiência energética e a neutralidade carbónica do setor dos edifícios são dois dos principais objetivos das políticas da União Europeia e de Portugal. A construção em madeira possui características especificas que contribuem para estes serem atingidos, pois: promove o aumento da produtividade permitindo obras mais rápidas e eficientes; é um recurso renovável, gerando menos emissões de carbono quando comparado com outros materiais, tanto na sua produção como ao longo do ciclo de vida; e também contribui para a conservação e manutenção das florestas, quando gerido de forma sustentável. No entanto, a madeira para construção é pouco utilizada em Portugal, devido à desconfiança quanto ao seu desempenho térmico e acústico, segurança ao fogo e pouca disponibilidade de matéria-prima.

Com o objetivo de reduzir a desconfiança neste tipo de soluções, o trabalho desenvolvido consistiu na análise de diversos materiais absorsores acústicos e de isolamento térmico, incluindo poliestirenos, lãs minerais, fibras naturais, compósitos e mantas acústicas, sendo estudada a possibilidade da sua incorporação em painéis pré-fabricados em madeira. A escolha do material teve como parâmetros principais a sua capacidade de isolamento térmico e de isolamento sonoro.

Constatou-se em primeiro lugar que os poliestirenos se apresentam como uma solução viável para isolamento térmico. Apesar deste fator, o mau desempenho acústico, resistência ao fogo e também os impactes ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis na sua produção prejudicam o seu uso na construção em madeira. Relativamente aos materiais naturais como a celulose ou cânhamo, é de constatar que o seu uso em conjunto com a madeira poderá ser viável, sendo, no entanto, necessários mais estudos. Os materiais compósitos constituídos por cimento e partículas de madeira apresentam o custo como o aspeto mais desfavorável, face ao seu desempenho térmico e acústico. As mantas acústicas não foram consideradas relevantes, tendo só o desempenho acústico como função principal, apresentando bom desempenho acústico principalmente aplicadas em lajes. As lãs minerais apresentam bom desempenho tanto térmico como acústico e foram um dos materiais absorventes em destaque tendo também a sua resistência ao fogo como vantagem. A cortiça também se destacou como material a incorporar na construção em madeira no país face ao desempenho térmico, acústico e também pela sua disponibilidade em Portugal. Conclui-se da presente dissertação que a construção em madeira traz diversos benefícios para o ambiente e também traz o regresso de uma técnica construtiva que sempre foi associada ao ser humano, contribuindo também para a descarbonização no país.



**Palavras-Chave**: Construção em madeira; Desempenho térmico; Desempenho acústico; Impacte ambiental; Neutralidade carbónica

## Abstract

Energy efficiency and carbon neutrality in the building sector are two main objectives of the European Union and Portuguese policies. Wooden construction has specific characteristics that contribute to these objectives, as it promotes increased productivity, allowing for faster and more efficient work. It is a renewable resource that generates fewer carbon emissions when compared to other materials both in its production and throughout its life cycle. It also contributes to the conservation and maintenance of forests, thus reducing the presence of greenhouse gases, when managed sustainably. Wood for construction is used scarcely in Portugal due to distrust regarding its thermal and acoustic performance, fire safety and low availability of raw materials.

To reduce distrust in this type of solution, the work involved analysing various acoustic absorbing and insulation materials, including polystyrene, mineral wool, natural fibers, composites, and acoustic membranes, and the possibility of their incorporation into prefabricated wooden panels. The choice of material considered its thermal, airborne and impact sound insulation as the main parameters for the analysis.

Firstly, it was found that expanded and extruded polystyrene were viable solutions for thermal insulation. However, poor acoustic performance, fire resistance and the environmental impacts of using fossil fuels hinder their use in wooden construction and make it undesirable to use them. Natural fibres, like cellulose or hemp, may be viable, but more studies are required. Among the materials of natural origin, wood fibres stand out. The cost of materials made of cement and wood particles is the most negative aspect, given their thermal and acoustic performance. Acoustic membranes that only act as acoustic insulation are not attractive. Mineral wools perform both thermally and acoustically well and are one of the features absorbing materials, with their fire resistance as a standout. Cork also stood out as a material to be incorporated into wooden construction in the country due to its thermal and acoustic performance and availability in Portugal. This work verified that wooden construction has several benefits for the environment and allows for returning a construction technique that has always been associated with humans. It is also a potential contributor to decarbonization in the country.

**Key Words**: Wooden construction; Thermal performance; Acoustic performance; Environmental impact; Carbon neutrality

# Índice

1. INTRODUÇÃO ..... 1
1.1 Enquadramento e Motivação ..... 1
1.2 Objetivos e resultados esperados ..... 3
1.3 Estrutura do documento ..... 4
2. ESTUDO DA LITERATURA E DO ESTADO DA ARTE ..... 5
2.1 Construção em madeira ..... 5
2.1.1 CLT ..... 8
2.1.2 Glulam ..... 10
2.2 Isolamento térmico e acústico de estruturas leves e requisitos regulamentares ..... 11
2.2.1 Isolamento térmico ..... 14
2.2.2 Isolamento sonoro ..... 17
2.3 Soluções construtivas usadas em edifícios em madeira ..... 23
2.3.1 Paredes ..... 23
2.3.1.1 Influência das portas e janelas no isolamento térmico e acústico em edifícios ..... 32
2.3.2 Lajes ..... 36
2.3.3 Influência das conexões na quebra do isolamento térmico e acústico ..... 44
2.4 Exemplos de edifícios em madeira ..... 46
2.4.1 Stadthaus, Reino Unido ..... 47
2.4.2 Virtuoso, Canadá ..... 49
2.4.3 MjØstårnet, Noruega ..... 50
2.4.4 Stories, Holanda ..... 51
3. ANÁLISE DE MATERIAIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO/ACÚSTICO ..... 53
3.1 EPS ..... 53
3.2 XPS ..... 55
3.3 Lã de rocha ..... 57
3.4 Lã de vidro ..... 60
3.5 Cortiça ..... 62
3.6 Fibra de Madeira ..... 65
3.7 Borracha ..... 67
3.8 Painéis compósitos de cimento com partículas de madeira ..... 69
3.9 Cânhamo ..... 70
3.10 Celulose ..... 72
3.11 Lã de Ovelha ..... 74
3.12 Manta Acústica 1 (IMPACTODAN) ..... 76

3.13 Manta Acústica 2 (MAD) ..... 77
3.14 Resumo das Características dos Materiais Analisados ..... 77
4. AVALIAÇÃO FINAL DOS MATERIAIS ABSORVENTES ..... 79
4.1 Classificação dos materiais absorventes ..... 79
5. CASO DE ESTUDO ..... 88
5.1 Caracterização do edifício e elementos em estudo ..... 88
5.2 Isolamento térmico dos elementos construtivos ..... 93
5.3 Isolamento acústico dos elementos construtivos ..... 101
5.3.1 Análise do desempenho acústico das soluções construtivas aplicadas ao edifício tipo ..... 104
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS ..... 115
6.1 Dificuldades encontradas ..... 117
6.2 Sugestões de estudos futuros ..... 118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 119
ANEXOS ..... 134
Anexo 1 Soluções Construtivas de paredes ..... 135
Anexo 2 Soluções construtivas de lajes ..... 137
Anexo 3 Edifícios em madeira lamelada cruzada (CLT): sete casos internacionais de edifícios residenciais com mais de três andares ..... 139
Anexo 4 Primeiro edifício de múltiplos apartamentos e andares da Austrália ..... 141
Anexo 5 Desempenho térmico e acústico dos materiais absorventes em estruturas de madeira ..... 142
Anexo 6 Preços dos materiais absorventes em função do isolamento e elemento construtivo ..... 143
Anexo 7 Matéria-Prima e unidade de produção dos materiais absorventes ..... 145
Anexo 8 Impactes ambientais dos materiais na fase de produção (categoria A1-A3) do berço ao portão por kg de material ..... 146
Anexo 9 Catálogo de materiais ..... 147
Anexo 10 Caracterização dos materiais utilizados no caso de estudo ..... 151
Anexo 11.1 Quadro de materiais ..... 152
Anexo 11.2 Resultados do isolamento sonoro das diferentes soluções construtivas inseridas no edifício tipo ..... 155
Anexo 11.3 Listagem de resultados ..... 171

## Lista de Acrónimos

ADP – Potencial de diminuição das reservas de recursos não-renováveis, acrónimo do inglês *Abiotic Depletion Potencial*

AP – Potencial de Acidificação, acrónimo do inglês *Acidification Potencial*

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno, acrónimo do inglês *Acrylonitrile Butadiene Styrene*

ANACOM – Autoridade Nacional de Comunicações

BSk – Clima de estepe fria de latitude média

CIT – Madeira Lamelada Cruzada Isolada, acrónimo do inglês *Cross Insulated Timber*

CLT – Madeira Lamelada Cruzada, acrónimo do inglês *Cross Laminated Timber*

COV – Compostos Orgânicos Voláteis

CPBD – Painéis de cimento e partículas de madeira, acrónimo do inglês *Cement Borded Particle Board*

Csa – Clima temperado com verão quente e seco

Csb – Clima temperado com verão seco e ameno

DAP – Declaração Ambiental de Produto

DLT – Tábuas de madeira lamelada unidas com ligações tipo cavilha, acrónimo do inglês *Dowel Laminated Timber*

D2m,nT,w – Índice de isolamento sonoro de fachada, *in situ*

Dn,e – Índice de isolamento de um elemento

Dn,e,w – Índice isolamento normalizado de um elemento

DnT,w – Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado, *in situ*

DWC – Espessura da placa de partículas de madeira

DWF – Espessura da placa de fibras de madeira

EJ – Exa joule

EP – Potencial de Eutrofização, acrónimo do inglês *Eutrophication Potencial*

EPS – Poliestireno Expandido, acrónimo do inglês *Expanded Polystyrene*

EUA – Estados Unidos da América

EWP – Produtos derivados da madeira, acrónimo do inglês *Engineered Wood Products*

ETICS – Sistema Compósito de Isolamento Térmico pelo Exterior, acrónimo do inglês *External Thermal Insulation Composite Systems*

GD – Graus-dia

GEE – Gases com Efeito de Estufa

GWP – Potencial de aquecimento global, acrónimo do inglês Global Warming Potencial

HFCs – Hidrofluorcarbonetos

ICB – Aglomerado de Cortiça Expandida, acrónimo do inglês *Insulation Cork Board*

IHRU – Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana

InCI – Instituto da Construção e do Imobiliário

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

L'n,w – Índice de isolamento sonoro a sons de percussão (normalizado), *in situ*

L'n,w – Índice de isolamento sonoro a sons de percussão (padronizado), *in situ*

L n,w – Índice de isolamento sonoro a sons de percussão (normalizado), em laboratório

LVL – Madeira laminada, acrónimo do inglês *Laminated Veneer Lumber*

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MDF – Placa de fibras de madeira de média densidade, acrónimo do inglês *Medium Density Fiberboard*

NaOH – Hidróxido de sódio

ODP – Potencial de degradação da camada de ozono, acrónimo do inglês *Ozone Depletion Potencial*

OSB – Placas de partículas orientadas, acrónimo do inglês *Oriented Strand Board*

PE-Re/PERT – Uso total de energia primária renovável, acrónimo do inglês *Total Primary Renewable Energy*

PENRT – Uso total de energia primária não renovável, acrónimo do inglês *Total Primary Non-Renewable Energy*

POCP – Potencial fotoquímico da produção de ozono, acrónimo do inglês *Photochemical Ozone Creation Potential*

PVC – Policloreto de vinilo

RNC2050– Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050

Rw – Índice de redução sonora, em laboratório

R'w – Índice de redução sonora aparente, *in situ*

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

RU – Reino Unido

U – Coeficiente de transmissão térmica

UE – União Europeia

$\theta_{ext,v}$ – Temperatura média exterior na estação de arrefecimento

XPS – Poliestireno Extrudido, acrónimo do inglês *Extruded Polystyrene*

# Índice de Figuras

Figura 1 – Réplica da gaiola pombalina do século XVII ..... 7
Figura 2 – Composição dos painéis CLT ..... 8
Figura 3 – Exemplo da utilização de Glulam - Jardim botânico de Taiyuan ..... 11
Figura 4 – Classificação climática de Köppen para Portugal ..... 17
Figura 5 – Transmissão do som entre compartimentos ..... 18
Figura 6 – Requisitos regulamentares do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre frações (valores em abril de 2019). Representação gráfica de valores equivalentes estimados do $D_{nT,w}$ ..... 20
Figura 7 – Transmissão sonora através do pavimento e entre compartimentos ..... 21
Figura 8 – Requisitos regulamentares do isolamento sonoro a sons de percussão entre frações. Valores em abril de 2019. Representação gráfica de valores equivalentes estimados do $L_{nT,w}$ ..... 22
Figura 9 – Esquema estrutural das paredes exteriores analisadas ..... 25
Figura 10 – Estrutura exposta de parede em montantes e ripas em moradia em Visby, em renovação, reabilitada em 2003 ..... 26
Figura 11 – Soluções estruturais estudadas: (a) parede CLT de referência, (b) parede CLT com isolamento, (c) parede maciça CLT, (d) parede em estrutura de madeira e (e) cobertura horizontal isolada (o lado interior encontra-se do lado esquerdo ou inferiormente, respetivamente) ..... 28
Figura 12 – Paredes duplas sem e com elemento resiliente ..... 30
Figura 13 – Índice de redução sonora de paredes duplas de madeira com e sem elemento resiliente 30
Figura 14 – Exemplos de paredes de separação entre frações leves e em blocos de betão ..... 31
Figura 15 – Índice de redução sonora das paredes duplas de repartição de frações leves e maciça ... 32
Figura 16 – Primeiro estudo de caso. a: visualização da amostra testada completa da grade utilizada para colocação da sonda nas posições de medição. b: mapa de nível de intensidade sonora antes das melhorias na instalação. Legenda à direita refere o nível de intensidade sonora em dB..... 35
Figura 17 – Corte transversal dos painéis CIT estudados com espessuras: a) 70 mm; b) 170 mm .... 36
Figura 18 – Configuração 1: Painel CLT ..... 37
Figura 19 – Configuração 2: Painel CLT com teto falso ..... 37
Figura 20 – Configuração 3: Painel CLT com piso flutuante ..... 38
Figura 21 – Configuração 4: Painel CLT com piso flutuante e teto falso ..... 38
Figura 22 Nível de pressão sonora de percussão para lajes em CLT (configurações 1, 2, 3 e 4). Fonte : máquina de passos ..... 39
Figura 23 – Soluções de parede, laje e cobertura ..... 40

Figura 24 – Diferentes tipo de parafusos, juntas e uniões usados em painéis de madeira pré-fabricados ..... 45
Figura 25 – Edifício Stadthaus em Londres ..... 47
Figura 26 – Edifício Virtuoso, Canadá ..... 49
Figura 27 – MjØstårnet. Vista do lago MjØsa ..... 50
Figura 28 – Edifício Stories, Países Baixos ..... 51
Figura 29 – Materiais estudados na dissertação ..... 53
Figura 30 – Placas EPS com diferentes espessuras ..... 54
Figura 31 – Placas XPS ..... 56
Figura 32 – Manta de lã de rocha ..... 58
Figura 33 – Lã de vidro em rolo ..... 60
Figura 34 – Amostras de diferentes placas de aglomerado de cortiça expandida (ICB) ..... 63
Figura 35 – Placas de fibra de madeira ..... 65
Figura 36 – Manta de borracha para isolamento acústico a ruídos de impacto ..... 69
Figura 37 – Exemplo de painel compósito de cimento com partículas de madeira ..... 69
Figura 38 – Placas de cânhamo ..... 71
Figura 39 – Vista microscópica de fibras de celulose, 10x ampliação ..... 72
Figura 40 – Lã lde ovelha e a respetiva aplicação num edifício ..... 75
Figura 41 – Mantas acústicas danosa (a) Impactodan (b) MAD ..... 76
Figura 42 – Avaliação da Lã de rocha ..... 85
Figura 43 – Avaliação da Lã de Vidro ..... 86
Figura 44 – Avaliação da Cortiça ..... 86
Figura 45 – Planta do piso 1 do edifício tipo estudado ..... 89
Figura 46 – Localização dos elementos construtivos em análise ..... 89
Figura 47 – Caracterização da parede de fachada ..... 90
Figura 48 – Caracterização da parede meeira ..... 91
Figura 49 – Caracterização da laje de separação de frações ..... 91
Figura 50 – Configuração da parede de fachada em alvenaria ..... 92
Figura 51 – Configuração da parede meeira ou interior em alvenaria ..... 92
Figura 52 – Solução de laje aligeirada de separação de frações ..... 93
Figura 53 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica da parede de fachada ..... 94
Figura 54 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica da parede meeira ..... 95

Figura 55 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica da laje de separação de frações ..... 96
Figura 56 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica da parede de fachada em alvenaria..... 98
Figura 57 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica da parede meeira ou interior em alvenaria ..... .99
Figura 58 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica da laje de separação de frações aligeirada ..... 100
Figura 59 – Índice de redução sonora associado à parede de fachada..... 102
Figura 60 – Índice de redução sonora associado à parede meeira..... 103
Figura 61 – Índice de isolamento a sons de percussão da laje de separação de frações ..... 104
Figura 62 – Índice de redução sonora da laje de separação de frações..... 104
Figura 63 – Compartimentos em estudo piso 1/ piso 2 ..... 105
Figura 64 – Índice de redução sonora da parede divisória..... 106
Figura 65 – Índice de redução sonora da porta..... 106
Figura 66 – Índice de redução sonora da janela..... 107
Figura 67 – Índice de isolamento normalizado da caixa de estores..... 107
Figura 68 – Índice de redução sonora da parede de fachada em alvenaria ..... 109
Figura 69 – Índice de redução sonora da parede de meeira em alvenaria..... 110
Figura 70 – Índice de isolamento sonoro a sons de percussão da laje de separação de frações, medido in situ..... 111
Figura 71 – Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea da laje de separação de frações, medido in situ ..... 111
Figura 72 – Índice de redução sonora da parede divisória em alvenaria..... 112

# Índice de Tabelas

Tabela 1 – Resumo dos resultados obtidos relativamente à perceção da importância do desempenho térmico e acústico de edifícios pesados e leves antes da visita ..... 13
Tabela 2 – Resumo de resultados obtidos relativamente à perceção da importância do desempenho térmico e acústico de edifícios pesados e leves após visita a estrutura leve em madeira ..... 13
Tabela 3 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximo dos elementos da envolvente opaca em edifícios de habitação – Portugal Continental e Região Autónoma da Madeira, Umax [W/(m$^2$.°C)] 15
Tabela 4 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximo dos elementos da envolvente opaca em edifícios de habitação – Região Autónoma dos Açores, Umax [W/(m$^2$.°C)] ..... 15
Tabela 5 – Valores médios de coeficientes de transmissão térmica máxima para diferentes climas com valor de graus-dia similares..... 16
Tabela 6 – Requisitos regulamentares de isolamento sonoro a sons aéreos entre espaços interiores de edifícios habitacionais e mistos ..... 19
Tabela 7 – Requisitos regulamentares de isolamento sonoro a sons aéreos entre o exterior e quartos ou zonas de estar de edifícios habitacionais e mistos ..... 19
Tabela 8 – Requisitos regulamentares de isolamento sonoro a sons de percussão entre espaços interiores de edifícios habitacionais e mistos ..... 21
Tabela 9 – Composição das paredes e da cobertura. $d_{tot}$ indica a espessura total do elemento e U (W m$^{-2}$ K$^{-1}$) representa o coeficiente de transmissão térmica do elemento considerando os coeficientes de transferência de calor de acordo com a EN ISO 6946:2017 ..... 28
Tabela 10 – Descrição dos elementos utilizados na laje ..... 37
Tabela 11 – Visão geral das propriedades dos materiais em estudo ..... 41
Tabela 12 – Parâmetros dos diferentes materiais estudados ..... 78
Tabela 13 – Distribuição dos pesos para os diferentes parâmetros analisados..... 79
Tabela 14 – Avaliação qualitativa dos materiais absorventes com base nos parâmetros definidos ..... 84
Tabela 15 – Pontuação e classificação final dos materiais absorventes com base nos parâmetros definidos ..... 84
Tabela 16 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da parede de fachada..... 94
Tabela 17 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da parede meeira ..... 95

Tabela 18 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da laje de separação de frações..... 97
Tabela 19 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da parede de fachada em alvenaria ..... 98
Tabela 20 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da parede meeira ou interior..... 99
Tabela 21 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da laje de separação de frações..... 101
Tabela 22 – Áreas e alturas para o compartimento em estudo ..... 105
Tabela 23 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho acústico da parede de fachada..... 108
Tabela 24 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho acústico da parede meeira ou interior..... 108
Tabela 25 – Verificação dos requisitos mínimos de desempenho acústico da laje de separação de frações, sons de percussão..... 108
Tabela 26 – Verificação dos requisitos mínimos de desempenho acústico da laje de separação de frações, sons aéreos..... 108
Tabela 27 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho acústico da parede de fachada em alvenaria ..... 112
Tabela 28 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho acústico da parede de meeira ou interior em alvenaria(adaptado de ..... 112
Tabela 29 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho acústico da laje aligeirada de separação de frações, sons de percussão..... 113
Tabela 30 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho acústico da laje aligeirada de separação de frações, sons aéreos..... 113

# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento e Motivação

A eficiência energética e a neutralidade carbónica no setor dos edifícios são um dos principais objetivos das políticas da União Europeia (EU) e de Portugal. Segundo a Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019 (2019), é na década de 2021-2030 que os maiores esforços para a redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), em busca de um futuro neutro em carbono, se devem concentrar. A criação do Roteiro Nacional para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) para o país estabelece uma trajetória com diversas estratégias que visam garantir um futuro com baixas emissões de gases com efeito de estufa, tal como previsto no Acordo de Paris. Em Portugal, atingir a neutralidade carbónica significa reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em mais de 85% em relação a 2005, tendo também de ser garantida uma capacidade de sequestro agrícola e florestal na ordem dos 13 milhões de toneladas(Agência Portuguesa do Ambiente, 2019).

Numa perspetiva global, dados do *2022 Global Status Report for Buildings and Construction* de Hamilton et al. (2022) mostram que, apesar do aumento de investimento na redução da intensidade energética dos edifícios a nível global, o consumo total de energia e as emissões de dióxido de carbono ($CO_2$) aumentaram em 2021 para valores acima dos pré-pandémicos. O consumo de energia aumentou por volta dos 4% desde 2020 para os 135 EJ em 2021, sendo este o maior aumento dos últimos 10 anos (International Energy Agency, 2022). As emissões de $CO_2$, no que toca à construção de edifícios, atingiu um recorde histórico de cerca de 10 $GtCO_2$ em 2021, sendo este aumento de 5% em relação a 2020 e 2% acima do pico que havia sido atingido em 2019 (International Energy Agency, 2022). O caminho da descarbonização poderá assim ter de ser ampliado para além de 2050. O setor dos edifícios, sendo responsável por 1/3 das emissões de GEE, apresenta-se como uma das soluções viáveis para a mitigação das alterações climáticas (Amiri et al., 2020).

Tendo em conta estes dados, a construção em madeira, devido às suas características, como a capacidade de armazenar $CO_2$ da atmosfera de forma eficaz e também ajudar na diminuição da pressão exercida sobre os recursos naturais, é uma técnica que pode ser utilizada para atingir os objetivos da UE e de Portugal de cumprir as metas traçadas no RNC2050 tanto no que diz respeito à mitigação das alterações climáticas como para a diminuição da pressão sobre os recursos naturais (Churkina et al., 2020). A compatibilização entre o uso sustentável da floresta e o uso da madeira, principalmente em

zonas urbanas onde existe uma maior procura de habitação, pode aumentar o armazenamento de carbono a longo prazo possibilitando o cumprimento das metas traçadas até ao ano de 2050 (Amiri et al., 2020).

Por outro lado, é importante sublinhar que, para além do uso da madeira em construção nova, esta pode também ser realizada para a reabilitação de edifícios, apesar de ter cada vez menos preponderância em Portugal com um decréscimo de 15% no total de obras de reabilitação concluídas em 2022 em comparação com o ano anterior (Instituto Nacional de Estatística, 2023). Edifícios reabilitados energeticamente com o uso de sistemas que privilegiem a absorção de carbono, sendo a utilização da madeira ( em estrutras ou para isolamento) uma das possibilidades, reduzem a energia operacional para o seu aquecimento e arrefecimento, melhorando tanto a eficiência energética como o desempenho térmico (Göswein et al., 2021).

A construção modular, possível em estruturas de madeira, é sugerida como forma de melhorar tanto a rapidez de construção como um meio para atingir as metas de descarbonização em 2050 (Göswein et al., 2021). Esta técnica de construção não é muito praticada em Portugal, apresentando um comportamento diferente das construções pesadas mais convencionais, como é o caso das em betão, criando desconfiança em relação ao seu desempenho térmico e acústico. Os países nórdicos, tais como; Finlândia, Suécia, Noruega, são alguns dos países que se destacam no uso da madeira na construção (Sikkema et al., 2023).

Apesar das vantagens das estruturas em madeira estas também apresentam desafios. Destacam-se os elevados custos iniciais devido à falta de economia de escala, a sua maior vulnerabilidade ao fogo, humidade e agentes xilófagos (fungos e bactérias), que requerem tratamentos específicos e manutenção, a necessidade de profissionais especializados para o seu dimensionamento (utilizando regulamentos como o Eurocódigo 5) e execução de estruturas com este material (Matos, 2024). Apresentam também debilidades no seu desempenho relativamente ao isolamento sonoro às baixas frequências, devido, por exemplo, a adultos ou crianças a andar ou correr (Bettarello et al., 2021). Este fator levou diversos países europeus a focarem a sua atenção no isolamento sonoro na gama de frequências dos 25 Hz aos 100 Hz, onde é mais provável apresentarem um desempenho inferior face às estruturas pesadas convencionais (Zhang et al., 2013). Caniato et al. (2017) referem que a comparação entre estruturas em madeira e estruturas convencionais mostra que a madeira emite cerca de 20 dB mais energia em baixas frequências.

Logo, de modo a investigar a possibilidade de mitigar as desvantagens das estruturas pré-fabricadas em madeira no que toca ao seu desempenho, foram analisados materiais que permitam assegurar o isolamento térmico e acústico de forma a serem selecionadas as melhores soluções para a construção desta tipologia de edifícios em Portugal, cumprindo a regulamentação portuguesa nestes 2 parâmetros. Além do isolamento térmico e acústico, apresentam-se também informações relativas à importância das conexões entre painéis na quebra do isolamento térmico e acústico, resistência ao fogo, impactes ambientais, custos e disponibilidade em Portugal que serviram de complemento para a escolha dos materiais a serem incorporados.

## 1.2 Objetivos e resultados esperados

Na presente dissertação, foi realizada uma pesquisa que visa analisar o desempenho de diversos materiais absorventes e resilientes (lã de rocha, lã de vidro, fibra de madeira, cortiça, entre outros), bem como a sua adequação para utilização em sistemas construtivos pré-fabricados em madeira, projetados para servirem de solução sustentável e alternativa à construção corrente em Portugal.

O objetivo global do trabalho realizado foi encontrar os materiais de isolamento térmico/absorção sonora mais adequados para serem incorporados em painéis modulares pré-fabricados de madeira com base na caracterização do seu desempenho. Os materiais foram divididos em orgânicos, naturais, compósitos e mantas acústicas. O comportamento dos materiais selecionados, quando aplicados a um sistema construtivo em madeira, foi avaliado através de métodos de cálculo e simulações.

Assim, identificaram-se os materiais com melhor desempenho e quantificou-se a contribuição destes para o isolamento térmico e acústico (sons aéreos e de percussão). As diferentes opções foram compiladas num catálogo de modo a ser fácil identificar a solução de material (isolamento térmico, absorção sonora e membrana acústica) mais indicado para o sistema construtivo em painéis modulares pré-fabricados em madeira, considerando as exigências a assegurar.

O desempenho das soluções construtivas foi avaliado num edifício modular tipo que tem de cumprir os requisitos regulamentares portugueses estipulados no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios e no Sistema de Certificação Energética de Edifícios.

## 1.3 Estrutura do documento

A dissertação está dividida em seis capítulos que visam esclarecer diversos aspetos do estudo desenvolvido:

- ✓ Primeiro Capítulo – Enquadramento do tema em estudo e estabelecimento dos objetivos a serem cumpridos;
- ✓ Segundo Capítulo – Estudo da literatura e do estado de arte onde se apresenta uma breve análise sobre a construção em madeira e revisão bibliográfica sobre diversas soluções construtivas de edifícios em madeira com o foco na análise do seu desempenho térmico e acústico;
- ✓ Terceiro Capítulo – Caracterização de materiais de isolamento tendo em conta o seu desempenho térmico, acústico, impactes ambientais, resistência ao fogo, custos e disponibilidade em Portugal;
- ✓ Quarto Capítulo – Avaliação e identificação dos melhores materiais de isolamento térmico, materiais e sistemas absorventes e membranas acústicas em função dos parâmetros considerados;
- ✓ Quinto Capítulo – Previsão do desempenho térmico e acústico (sons aéreos e de percussão), com aplicação dos materiais selecionados nos sistemas construtivos pré-fabricados em madeira (parede e laje) considerando edifício habitacional tipo na cidade de Braga;
- ✓ Sexto Capítulo – Apresentação das conclusões da dissertação com a apresentação das considerações finais sobre o trabalho realizado, dificuldades encontradas e sugestão de trabalhos futuros.

Do documento fazem também parte 11 anexos onde são apresentados exemplos de soluções construtivas de paredes e lajes em madeira, exemplos de edifícios em madeira, desempenho térmico e acústico de materiais absorventes em estruturas de madeira, os seus custos, a matéria-prima necessária para a sua produção e unidades fabris em Portugal, impactes ambientais, um catálogo com a caracterização de três materiais absorventes e por último, um anexo referente à análise do desempenho acústico do ao caso de estudo.

# 2. Estudo da literatura e do estado da arte

## 2.1 Construção em madeira

O aumento generalizado da população mundial, a agricultura intensiva e as alterações climáticas estão a conduzir ao aumento da extração dos recursos da natureza dificultando a capacidade da sua gestão (Sikkema et al., 2023). Para assegurar a sustentabilidade do ambiente num contexto económico em expansão, é fundamental o desenvolvimento de ferramentas e de estudos que visem dar a conhecer à população as melhores práticas para a mitigação destes problemas.

Em Portugal, os edifícios, incluindo os habitacionais e os de serviços, são responsáveis por cerca de 30% do consumo de energia final e são uma das fontes mais importantes de emissões de $CO_2$ (Agência Portuguesa do Ambiente, 2019). A nível global, o setor da construção apresenta um nível de consumo e de emissão de poluentes que tornam este setor num dos mais prejudiciais para o ambiente, sendo responsável por (Comissão Europeia, 2011; Hurmekoski, 2017)

- 42% do total de consumo de energia;
- 35% do total de emissões de gases com efeito de estufa;
- 50% dos materiais extraídos;
- 30% do consumo de água.

Os valores apresentados referem-se ao ciclo de vida total dos edifícios, desde a produção dos materiais para a sua conceção até ao seu desmantelamento (Hurmekoski, 2017). Hurmekoski (2017) salienta que a maioria das emissões de gases com efeito de estufa concentra-se na necessidade de aquecimento ou arrefecimento durante a fase de utilização dos edifícios. Assim, os materiais de isolamento térmico têm um papel fundamental para o bom desempenho dos edifícios, através da redução das necessidades energéticas.

De forma a dar resposta a este problema, a maioria dos países europeus está a recuperar e a criar métodos de construção em resposta ao excesso de extração dos materiais. A emergência climática no século XXI trouxe um renovado interesse nos produtos derivados da madeira, que se apresentam como energeticamente eficientes e com baixo teor de carbono (Sikkema et al., 2023). As árvores, de onde provém a matéria-prima, produzem oxigénio; e podem absorver mais de 1,4 toneladas métricas de carbono por cada tonelada de madeira cultivada, sendo que um metro cúbico de madeira pode armazenar uma tonelada de $CO_2$ (Lehmann, 2012). No que toca às emissões de $CO_2$, a construção em

madeira pode representar uma redução de até 40% nas emissões comparando com o betão (Comité Económico e Social Europeu, 2023).

Apostar no uso de materiais de origem local, com baixo teor de carbono incorporado, como é o caso da madeira, bambu, argila, pedra e; resíduos da agricultura tais como a palha, tem grande impacto na redução das emissões dos GEE no setor da construção (Hamilton et al., 2022). A utilização de produtos de origem local é também relevante, pois permite reduzir de forma significativa as emissões provenientes do setor dos transportes e também contribuir para o produto interno bruto nacional.

A madeira como material de construção já é usada desde os primórdios da vida humana, não sendo uma novidade a sua aplicação (Lourenço et al., 2012). Por ser um material de origem natural, era já bastante utilizado por ser acessível às populações. A importância da madeira na história do Homem é considerável e fundamental. Na pré-história, as árvores eram refúgios, pois, devido à sua altura, protegiam-no do ataque dos predadores. Mais tarde, surgiram as cabanas que permitiam ao ser humano o abrigo ao nível do solo. A descoberta do fogo também só foi possível devido à madeira. A utilização do fogo permitiu ao Homem tornar-se superior ao animal selvagem. A utilização da madeira tinha diversas aplicações, tais como, o fabrico de armas, ferramentas e também a movimentação de cargas pesadas (Eynard, 2002).

Desde o aparecimento do Homem, a técnica e arte de trabalhar a madeira têm evoluído, começando por um processo manual e primitivo, até à vasta e industriosa indústria moderna com a utilização dos produtos derivados da madeira (EWP), tais como os painéis de madeira lamelada cruzada (CLT), vigas de madeira lamelada colada (Glulam), madeira laminada (LVL), ou as vigas em I, que permitem o cumprimento dos regulamentos relativos às exigências estruturais (Hurmekoski, 2017).

Em Portugal, a construção em madeira não é muito representativa na construção tradicional. Além da desconfiança associada ao seu desempenho térmico e acústico, a falta de madeira proveniente da floresta portuguesa para dar face à procura leva à necessidade da sua importação. Apesar de um terço do território do país ser ocupado por floresta, são diversos os fatores que condicionam a sua utilização como material de construção, tais como (The Navigator Company, 2022):

- Dimensão reduzida da propriedade florestal, sobretudo no Norte e Centro, com donos desconhecidos, resultando na baixa produtividade e rentabilidade;
- Falta de planeamento e gestão florestal, que aumentam o risco de incêndios;
- Abandono da floresta por despovoamento rural e envelhecimento da população;

- Pressão exercida pelas alterações climáticas que obrigam ao abate de árvores que levam à inutilização da madeira.

No entanto, mais recentemente tem sido incentivado o uso da madeira devido à necessidade de descarbonização do planeta Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019 (2019), pois é um material que permite o armazenamento do dióxido de carbono, além de ser o único renovável que é fornecido pela natureza (Lourenço et al., 2012).

Um dos principais sistemas de construção em madeira em destaque no país foi a gaiola pombalina. A estrutura é anti-sísmica e foi usada após o terremoto de 1755 que assolou a cidade de Lisboa. A sua conceção resultou de uma reunião do Marquês do Pombal com os seus engenheiros militares para a criação de um sistema anti-sismo para todo o edificado, surgindo então a gaiola, considerada o sistema mais avançado do século XVII e incomparável com outros sistemas em vigor na época (Tobriner, 2001). No entanto, a madeira foi incorporada à alvenaria com o objetivo de aumentar a resistência ao fogo, beneficiando assim das qualidades de ambas as estruturas. O estilo pombalino também constituiu algo novo no que toca ao recurso à pré-fabricação (Hisour, sem data). Na Figura 1 apresenta-se uma réplica de uma gaiola pombalina utilizada no século XVIII.

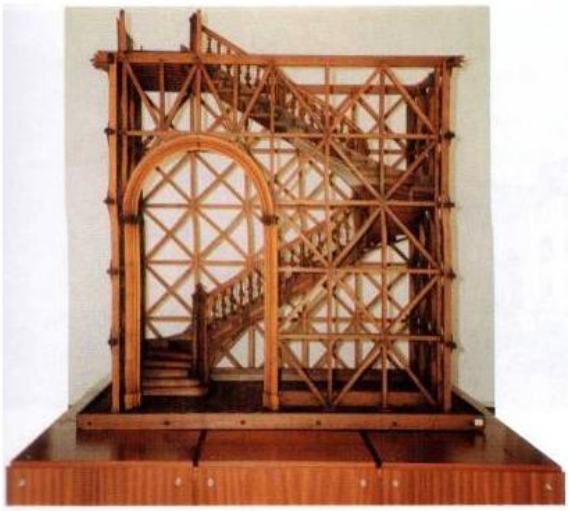


Figura 1 – Réplica da gaiola pombalina do século XVII (NESDE, 2005)

Foi no final dos anos 80 do século XX que se verificou um aumento mais significativo do uso de madeira maciça e em painel nos países da Europa, como, por exemplo, no Reino Unido, Áustria, Itália e Alemanha (Hildebrandt et al., 2017). A Estónia é atualmente o país que apresenta maior rácio (0,32 $m^3$) do consumo nacional aparente de madeira para construção pela área útil das habitações terminadas em $m^2$, podendo tornar-se um líder global na inovação da construção em madeira (Sikkema, et al., 2023).

Para além dos países nórdicos, existem alguns exemplos de países do Sul da Europa que têm impulsionado o uso da madeira no setor da construção, como é o caso da França, que legislou que em edifícios públicos, construídos a partir de 2022, é obrigatória a utilização de madeira em cerca de 50% da sua estrutura (Gonçalves, 2022).

De seguida, referem-se mais pormenorizadamente dois dos produtos de engenharia derivados da madeira mais utilizados, CLT e Glulam.

### 2.1.1 CLT

A introdução do CLT no mercado da construção deu-se no início dos anos 90 do século XX, na Áustria e Alemanha, e desde então tem ganho popularidade na Europa, tanto na construção de edifícios residenciais como não residenciais (Mohammad et al., 2012).

Os painéis CLT consistem em várias camadas de madeira estrutural em placas que são empilhadas transversalmente (usualmente a 90º) coladas ao longo do seu comprimento e de forma menos frequente, da sua largura. A secção transversal é constituída normalmente numa gama de 3 a 7 camadas sobrepostas, com espessuras que variam entre 17 e 38 mm, de placas coladas ortogonalmente com orientações alternadas (Mohammad et al., 2012; Tenório, 2022). Estes painéis não são apenas um 'produto', são um sistema construtivo (Lehmann, 2012). Como elemento estrutural, podem ser utilizados em paredes, tanto de fachada como divisórias, e em lajes (Brandner et al., 2016). Na Figura 2, é apresentado um exemplo de painéis CLT e a forma como são dispostas as suas camadas

.

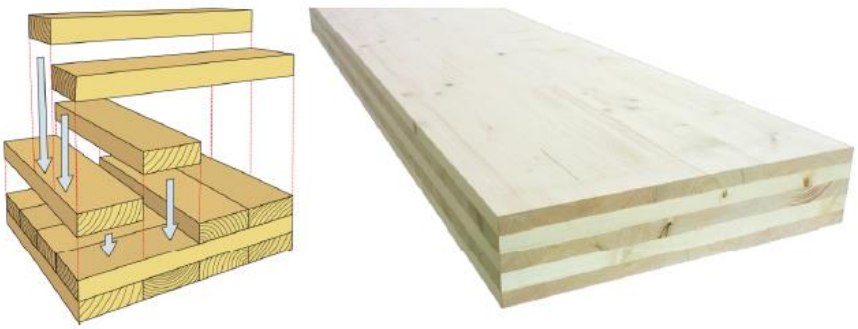


Figura 2 – Composição dos painéis CLT (Di Bella et al., 2020)

A nível estrutural, Santos et al. (2019) estudaram o cumprimento da norma EN 16351:2015[1] (CEN 2015) (teste que avalia a qualidade da ligação entre painéis através da introdução de tensões internas que provocam o encolhimento/dilatação da madeira que são geradas pela saturação com água e posterior secagem) para painéis CIT (painéis de madeira lamelada cruzada isolados). Estes apresentam duas camadas típicas de painéis CLT, sendo utilizado como ligação entre camadas poliuretano (Santos et al., 2019). Paras os painéis de madeira (amostras utilizadas com 15 mm e 35 mm), foi utilizado pinho marítimo (madeira típica da floresta portuguesa) e madeira negra australiana que apresenta propriedades similares, ao nível de densidade e também mecânico, ao pinho marítimo. Os resultados mostraram que existem duas formas para a colagem cruzada do pinho marítimo: aumento da pressão de colagem e do espalhamento do adesivo com menor tempo de pré-tratamento ou um nível de pressão mais baixo (0,6 MPa) e menor taxa de espalhamento com o dobro do tempo de pré-tratamento (Santos et al., 2019).

As principais vantagens dos painéis CLT são as seguintes: é um recurso renovável, com pegada de carbono muito baixa; permite rapidez de montagem, por ser um material pré-fabricado; redução de custos (do projeto à execução); segurança no local; construção leve (propício para edifícios de vários andares); resistência sísmica; bom desempenho térmico e higrométrico; bom desempenho acústico (elementos alinhados); e boa resistência ao fogo (Di Bella et al., 2020). No entanto, existem também desvantagens associadas a este produto. O desempenho acústico pode ser pouco satisfatório quando é feita uma análise mais profunda para frequências abaixo dos 100 Hz (Vairetti et al., 2021).

O custo pode ser desfavorável em países com escassez de matéria-prima (a madeira de abeto é a mais usualmente utilizada) (Mohammad, Gagnon, Douglas et al., 2012). Outra desvantagem associada à sua produção é a emissão de Compostos Orgânicos Voláteis (COV), sendo de destacar o formaldeído. São consideradas duas origens de emissão de formaldeído na produção dos painéis: os contidos nos adesivos e os da própria madeira, sendo aconselhável o uso de produtos alternativos que captem as emissões deste composto (Hemmilä et al., 2017).

A emissão de COV encontra-se associada aos EWP e prejudica o ambiente pela emissão de gases tóxicos para o ser humano, e também prejudica a capacidade de reciclar e reutilizar os materiais (Sotayo et al., 2020). Para evitar o uso de adesivos, têm sido desenvolvidos diferentes produtos como é o caso tábuas de madeira lamelada unidas com ligações tipo cavilha (DLT) que, segundo Henderson et al. (2012),

[1] A Norma EN 16351:2015 estabelece disposições para as características de desempenho da madeira estrutural laminada cruzada (CLT), reta ou curva, com ou sem juntas articuladas de grandes dimensões, como material para o fabrico de elementos estruturais para utilização em edifícios e pontes.

permitem melhorar a qualidade do ar interior (comparando com o uso de adesivos), a execução da obra e reduzir a incorporação de carbono. Apesar disso, estas reivindicações são baseadas em estudos qualitativos, sendo necessários mais dados suplementares do impacto ao longo do ciclo de vida para perceber e quantificar o real impacte ambiental associado (Sotayo et al., 2020).

A Comissão Europeia, com base neste pressuposto, limitou a quantidade de formaldeído que os produtos derivados de madeira podem conter, tendo estes de apresentar um teor ponderal de COV das substâncias ou misturas de tratamento de superfície inferior a 5%, no entanto, caso este valor não seja verificado, devem ser efetuados cálculos em função da quantidade de COV por área, em $m^2$, de superfície do revestimento (Comissão Europeia, 2017).

### 2.1.2 Glulam

A madeira lamelada colada (Glulam) também é um sistema utilizado pelo setor da construção. O produto é constituído por múltiplas camadas individuais (com cerca de 45 mm de espessura) coladas em condições controladas, sendo a sua aplicação feita em elementos lineares como vigas e pilares (Hassan et al., 2022). De destacar que este material é o mais antigo dos produtos derivados de madeira e pode ser frequentemente encontrado na forma de grandes vigas curvas ou secções variáveis em edifícios públicos e pavilhões desportivos (Tenório, 2022). O facto de serem coladas na horizontal permite obter variadas formas consoante as pretensões do projetista.

Relativamente ao estudo de elementos estruturais em Glulam, Zhou et al. (2022) analisaram o comportamento à compressão de dois tipos de pilares em Glulam de bambu (denominados de glubam), sendo o tipo um constituído por camadas de espessura superior (com 5 a 8 mm de espessura e largura de 20 mm) e o tipo dois constituído por camadas com espessura inferior (2 mm de espessura e 20 mm de largura das tiras utilizadas). Os pilares testados possuíam uma espessura de 30 mm e secção 60 mm x 60 mm para o tipo um e 28 mm de espessura e secção 56 mm x 56 mm para o tipo dois. Os ensaios mostraram dois mecanismos de rutura, sendo, para os pilares mais curtos, devido à falta de resistência e, para os pilares mais longos (esbeltos), a encurvadura (Zhou et al., 2022).

Na Suécia, país com elevada produção de madeira, Hassan et al. (2022) compararam em termos estruturais, económicos e ambientais, vigas de betão e vigas em Glulam. Ao nível estrutural, constataram que o Glulam é mais sensível à flexão quando comparado com o betão. Economicamente, a partir de um

comprimento de 4 metros, as vigas Glulam apresentam melhores resultados, sendo o betão menos vantajoso, uma vez que os custos de mão-de-obra começam a ser avultados a partir de vigas com 3 metros de comprimento. No que respeita à análise ambiental, a madeira apresenta resultados mais satisfatórios do que o betão, mas no que toca à reutilização de resíduos, o betão apresenta melhor desempenho, pois o Glulam é um material que, em resíduo, é incinerado e liberta o $CO_2$ que havia sido armazenado até então.

Em construções com o uso de Glulam, a zona mais critica é onde se efetuam as ligações entre elementos. As conexões mais utilizadas para este material são as cavilhas, espigas de encaixe, colagem com adesivos e hastes coladas, sendo também de destacar o uso de parafusos auto-roscantes e chapas metálicas em estruturas espaciais (Liu et al., 2023).

As vantagens deste produto são similares às apresentadas para os painéis CLT. Comparando-o a uma viga de madeira maciça, apresenta maior resistência estrutural com uma probabilidade menor de existirem defeitos (nós) na sua secção (Hassan et al., 2022).

A reputação deste produto também se deveu à sua versatilidade, que permite estruturas esteticamente agradáveis sem necessidade de embelezamento pela adição de revestimento, diminuindo os gastos, e uma relação elevada entre resistência e a sua massa (How et al., 2016). As desvantagens são a sua vulnerabilidade a danos causados pela água, fogo, decomposição e deterioração biótica causada por fungos, por exemplo, que levam a que seja necessária manutenção (Hassan et al., 2022). Na Figura 3, apresenta-se um exemplo da utilização de Glulam.

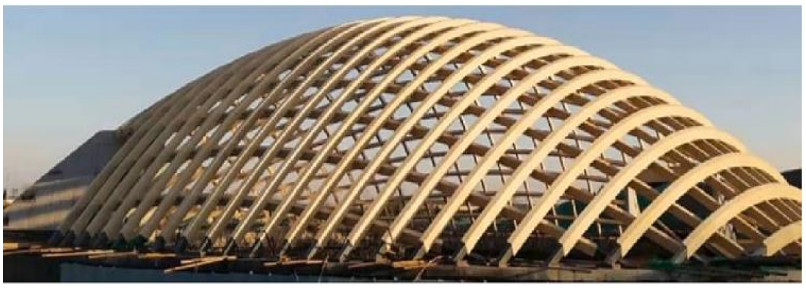


Figura 3 – Exemplo da utilização de Glulam - Jardim botânico de Taiyuan (Liu et al., 2023)

## 2.2 Isolamento térmico e acústico de estruturas leves e requisitos regulamentares

Vários materiais podem ser usados estruturalmente nos edifícios, sendo os mais usuais o aço, madeira, tijolo e betão. No caso do aço e madeira, são geralmente caracterizados como estruturas leves com uma

massa a rondar os 100 kg/m$^2$ de área de superfície do piso, sendo as estruturas consideradas pesadas caracterizadas pela utilização de materiais como o tijolo e betão onde os valores ascendem a valores próximos dos 500 kg/m$^2$ (Hoes et al., 2016).

Em termos ambientais as construções leves apresentam vantagens em comparação com as em betão, pois são constituídas por elementos leves que não necessitam de equipamentos de transporte de cargas com capacidades muito elevadas, usam menor quantidade material e a rapidez da sua construção permite diminuir a emissão de gases com efeito de estufa (Cole, 1998).

Em termos de desempenho térmico e acústico, Caniato et al. (2017) realizaram estudos, através de análises subjetivas da opinião popular, onde avaliam a opinião de pessoas, oriundas de Itália (cerca de 60%) e de outros países a nível internacional (Austrália, Quénia, Japão, Reino Unido, Eslovénia, Áustria, Espanha e Bélgica), em relação a diferenças de desempenho entre edifícios em madeira (leves) e tradicionais (pesados), através do preenchimento de um questionário. Nos estudos, foi feita a comparação entre a perceção que a população tem no que toca ao isolamento térmico e acústico de edifícios com estruturas leves e pesadas, sendo que a escala utilizada (com 5 níveis) varia de muito importante a sem importância. Foram consideradas as opiniões antes e depois dos participantes realizarem uma visita a um edifício em madeira, para identificar as perceções pré-estabelecidas. O estudo procurou incluir todas as classes sociais e faixas etárias para obter uma visão mais ampla e rigorosa da perceção da população em relação à importância do desempenho térmico e acústico de edifícios leves e pesados e retirar conclusões relativamente ao seu comportamento.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos tanto para os intervenientes oriundos de Itália como para os oriundos dos restantes países, antes da visita, tendo as respostas por base a sensibilidade e conhecimentos prévios dos inquiridos.

Pela análise da Tabela 1, constata-se que existe uma boa aceitação por parte dos inquiridos relativamente às estruturas leves. O isolamento térmico é mais valorizado em estruturas pesadas. Sendo assim os inquiridos tendem a ter mais confiança no isolamento térmico assegurado, por exemplo, pelas construções em madeira do que o isolamento térmico assegurado pelos edifícios com estrutura em betão, tendo este último maior necessidade de incorporar materiais como lã de rocha ou poliestireno expandido (EPS), de modo a assegurar o conforto térmico interior e cumprir os regulamentos.

No que toca ao isolamento acústico, o cenário é diferente. Nos inquéritos, a nível internacional, é dada mais importância ao isolamento acústico em edifícios com estruturas leves do que em edifícios com

estruturas pesadas. Verifica-se assim que a preocupação da maioria dos participantes do estudo se localiza no desempenho acústico dos edifícios leves.

Tabela 1 – Resumo dos resultados obtidos relativamente à perceção da importância do desempenho térmico e acústico de edifícios pesados e leves antes da visita (adaptado de (Caniato et al., 2017))

| Descrição | Tipo de estrutura | Comportamento | Muito importante (%) | Importante (%) | Outros (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Austrália, Quénia, Japão, Reino Unido, Eslovénia, Áustria, Espanha e Bélgica** | | | | | |
| - Isolamento térmico | Pesada | Térmico | 70 | 24 | 6 |
| - Isolamento acústico | | Acústico | 52 | 42 | 6 |
| - Isolamento térmico | Leve | Térmico | 70 | 27 | 3 |
| - Isolamento acústico | | Acústico | 36 | 39 | 25 |
| **Itália** | | | | | |
| - Isolamento térmico | Pesada | Térmico | 86 | 14 | 0 |
| - Isolamento acústico | | Acústico | 56 | 38 | 6 |
| - Isolamento térmico | Leve | Térmico | 85 | 14 | 1 |
| - Isolamento acústico | | Acústico | 55 | 37 | 8 |

A Tabela 2 apresenta os resultados dos inquéritos administrados após a visita a um edifício com estrutura leve em madeira.

Tabela 2 – Resumo de resultados obtidos relativamente à perceção da importância do desempenho térmico e acústico de edifícios pesados e leves após visita a estrutura leve em madeira (adaptado de (Caniato et al., 2017))

| Descrição | Tipo de estrutura | Comportamento | Muito importante (%) | Importante (%) | Outros (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Resultados da Visita – Interior do Edifício** | | | | | |
| - Isolamento térmico | Pesada | Térmico | 65 | 35 | 0 |
| - Isolamento acústico | | Acústico | 54 | 46 | 0 |
| - Isolamento térmico | Leve | Térmico | 72 | 28 | 0 |
| - Isolamento acústico | | Acústico | 44 | 55 | 1 |
| **Resultados da Visita – Após Visita ao Edifício** | | | | | |
| - Isolamento térmico | Pesada | Térmico | 70 | 26 | 4 |
| - Isolamento acústico | | Acústico | 61 | 35 | 4 |
| - Isolamento térmico | Leve | Térmico | 83 | 16 | 1 |
| - Isolamento acústico | | Acústico | 75 | 25 | 0 |

Após a visita ao edifício em madeira, algumas perceções são mantidas, como o facto de ser dada mais importância ao isolamento térmico dos edifícios. Apesar desta constatação o balanço é mais equilibrado comparando com as respostas antes da visita ao edifício em madeira.

Da análise da Tabela 2, verifica-se que o desempenho acústico foi subestimado por parte dos inquiridos. Caniato et al. (2017) concluíram que os inquiridos leigos na matéria consideraram os edifícios de madeira superiores em todos os aspetos, mesmo no desempenho acústico, muito provavelmente devido ao estereótipo de "habitação perfeita". Os resultados demonstraram que o conhecimento muda a perceção das pessoas em relação aos parâmetros estudados sendo de destacar a mudança de opinião quanto à importância do projeto de isolamento acústico antes e depois da visita.

### 2.2.1 Isolamento térmico

As estruturas leves pré-fabricadas em madeira estão presentes em todo o mundo e a sua tendência no mercado é crescente, uma vez que, por exemplo, no que toca ao isolamento térmico, a sua prestação é bastante satisfatória (Caniato et al., 2017).

A necessidade de aquecer os edifícios no inverno e arrefecer no verão, conduzindo a elevados consumos energéticos ao longo da vida útil dos edifícios, torna a escolha do material de isolamento térmico um elemento-chave na conceção de um edifício. Uma das soluções mais usadas de forma a diminuir o impacte ambiental associado ao período de utilização de um edifício é a aplicação de materiais de isolamento térmico, sendo a variedade de escolha cada vez maior. A grande panóplia de materiais, que é acompanhada por alguma falta de informação do seu desempenho, conduz a alguma dificuldade na escolha da opção ideal e à utilização dos materiais mais convencionais (Dickson et al., 2021).

A capacidade de isolamento térmico depende da condutibilidade térmica do material (λ, W/(m.°C). A condutibilidade térmica mede a quantidade de energia que atravessa os materiais. Quanto mais baixo for este valor, mais difícil será a energia ser libertada e a temperatura interior será mais facilmente mantida aos níveis necessários para assegurar o conforto térmico dos utilizadores (Dos Santos et al., 2006).

No caso de um edifício, torna-se fundamental conhecer as trocas de calor pela envolvente, nomeadamente através dos envidraçados, paredes, coberturas e pavimentos, que vão depender do valor do coeficiente de transmissão térmica (U) desses elementos (Duarte et al., 2022).

Nas Tabelas 3 e 4 , encontram-se listados os valores do $U_{máx}$ para os elementos construtivos de edifícios de habitação em Portugal Continental/Região Autónoma da Madeira e Região Autónoma dos Açores, respetivamente, definidos na Portaria n.º138-I/2021 (Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e

Habitação 2021). Este valor está dependente da zona climática definida no Despacho n.°6476-H/2021 (Ambiente e Ação Climática - Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021), das condições fronteira, da disposição do elemento opaco e também do coeficiente de redução de perdas ($b_{ztu}$). O coeficiente de redução de perdas varia entre 0 e 1, sendo 0 quando a temperatura do espaço não útil (não climatizado) é igual à temperatura no interior do edifício e 1 quando o espaço não útil está à temperatura do exterior. Em Portugal são definidas três zonas climáticas para o inverno (I1, I2, I3) e três zonas climáticas para o verão (V1, V2, V3). O rigor de cada estação aumenta desde I1 a I3 ou V1 a V3.

A zona climática de inverno é definida segundo os graus-dia (GD) na estação de aquecimento, na base de 18°C, sendo para o verão, definida a partir temperatura média exterior na estação de arrefecimento ($\theta_{ext, v}$).

Tabela 3 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximo dos elementos da envolvente opaca em edifícios de habitação – Portugal Continental e Região Autónoma da Madeira, $U_{max}$ [W/(m².°C)] (adaptado de (Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e Habitação, 2021))

| Portugal Continental e Região Autónoma da Madeira | | | Zona climática | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Tipo de elemento | | Condição fronteira | I1 | I2 | I3 |
| Zona corrente da envolvente | Verticais | Exterior ou interior com bztu > 0,7 | 0,50 | 0,40 | 0,35 |
| | | Interior com bztu ≤ 0,7 | 2,00 | 2,00 | 1,90 |
| | Horizontais | Exterior ou interior com bztu > 0,7 | 0,40 | 0,35 | 0,30 |
| | | Interior com bztu ≤ 0,7 | 1,65 | 1,30 | 1,20 |
| Zona de ponte térmica plana | Verticais | Exterior | 0,90 | | |
| | | Interior com bztu > 0,7 | 1,75 | 1,60 | 1,45 |
| | | Interior com bztu ≤ 0,7 | 2,00 | 2,00 | 1,90 |
| | Horizontais | Exterior | 0,90 | | |
| | | Interior com bztu > 0,7 | 1,25 | 1,00 | 0,90 |
| | | Interior com bztu ≤ 0,7 | 1,65 | 1,30 | 1,20 |

Tabela 4 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximo dos elementos da envolvente opaca em edifícios de habitação – Região Autónoma dos Açores, $U_{max}$ [W/(m².°C)] (adaptado de (Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e Habitação, 2021))

| Região Autónoma dos Açores | | | Zona climática | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Tipo de elemento | | Condição fronteira | I1 | I2 | I3 |
| Zona corrente da envolvente e de ponte térmica plana | Verticais | Exterior ou interior com bztu > 0,7 | 1,75 | 1,60 | 1,45 |
| | | Interior com bztu ≤ 0,7 | 2,00 | 2,00 | 1,90 |
| | Horizontais | Exterior ou interior com bztu > 0,7 | 1,25 | 1,00 | 0,90 |
| | | Interior com bztu ≤ 0,7 | 1,65 | 1,30 | 1,20 |

Na Tabela 5, estão listados os valores médios máximos do coeficiente de transmissão térmica em alguns países e também é apresentado o valor do U máximo exigido no sistema *passivhaus* (padrão de construção desenvolvido na Alemanha pelo *Passivhaus-Institute* em Darmstadt), estabelecendo-se comparações entre eles (Rodríguez-Soria et al., 2014). Para os valores serem equivalentes para as

regulamentações de todos os países envolvidos, foi considerada a mesma envolvente térmica (composta por uma percentagem de superfície dos diferentes elementos construtivos). Um *passivhaus* é definido como um exemplo de uma residência com consumos energéticos muito baixos, tanto para a estação de aquecimento como de arrefecimento dos espaços.

Tabela 5 – Valores médios de coeficientes de transmissão térmica máxima para diferentes climas com valor de graus-dia similares (adaptado de (Rodríguez-Soria et al., 2014))

| Tipo de elemento construtivo | Média do limite de transmissão térmica dependendo do tipo de envolvente do edifício [W/(m².°C)] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Alemanha | França | Inglaterra e País de Gales | Espanha | Sistema *Passivhaus* | EUA (ASHRAE) |
| Paredes Exteriores | 0,20 | 0,36 | 0,25 (0,30)* | 0,57 | 0,15 | 0,45 |
| Pavimentos exteriores | 0,28 | 0,27 | 0,18 (0,25) | 0,48 | 0,15 | 0,27 |
| Coberturas | 0,20 | 0,20 | 0,15 (0,20) | 0,35 | 0,15 | 0,36** |
| Janelas/Portas | 1,30 | 1,80 | 1,60 (2,00) | 2,70 | 0,80 | 1,99 |
| Média do coeficiente de transmissão térmica do edifício (H)*** | 0,385 | 0,513 | 0,410 | 0,812 | 0,247 | 0,613 |

Notas:

* O valor mais baixo permitido para as melhores instalações está listado entre parênteses.

** Valor do coeficiente de transmissão térmica quando a cobertura está sobre sótão habitável.

*** Assume-se que a superfície da parede exterior é igual à soma da superfície do pavimento e da cobertura e também com uma percentagem de janelas/porta de aproximadamente 30%.

A Espanha é, desta lista de zonas de países com condições climáticas similares, o país que apresenta menor necessidade de adequação climática. Inglaterra, País de Gales e Alemanha têm os valores mais baixos e aproximam-se mais do valor do Sistema *Passivhaus*. Os valores apresentados pelos Estados Unidos da América (EUA) estão, em média entre os de França e de Espanha. No entanto, comparando com a média europeia os EUA são menos exigentes.

A nível térmico, também é importante salientar as características climáticas do país. De acordo com o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), na maior parte do território de Portugal Continental, segundo a classificação de Köppen-Geiger, que corresponde à última revisão de Köppen (Figura 4), o clima é temperado (Tipo C). Existem três regiões que se destacam: uma que apresenta um clima temperado com Verão quente e seco (Csa), localizado nas regiões interiores do Douro, assim como nas regiões a Sul do sistema montanhoso Montejunto-Estrela (exceto no litoral oeste do Alentejo e Algarve); clima temperado com Verão seco e ameno (Csb), em quase todas as regiões a norte do sistema montanhoso Montejunto-Estrela e nas regiões litoral oeste do Alentejo e Algarve, e por último na região do Baixo Alentejo, encontra-se uma pequena região com clima árido (tipo B) com a variedade clima de estepe fria da latitude média (BSk) (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2024).

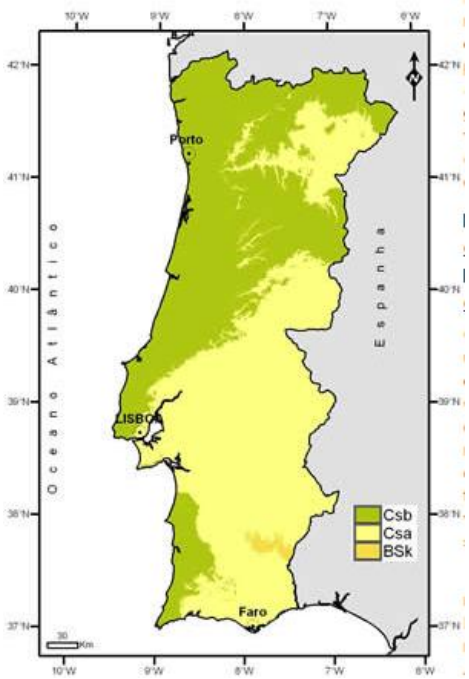



Figura 4 – Classificação climática de Köppen para Portugal (adaptado de (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2024))

### 2.2.2 Isolamento sonoro

Ao nível do isolamento sonoro a preocupação concerne sobretudo com a presença do ruído que causa incómodo ao ser humano. Nas habitações, a transmissão de ruídos das frações vizinhas destaca-se como tendo uma elevada quantidade de informação, como as conversas, música, arrastar de móveis etc., sendo normal o ser humano prestar atenção a estes ruídos, mesmo quando são mais baixos (Maschke et al., 2007). Para assegurar o desempenho adequado dos edifícios, são necessários materiais absorventes acústicos e materiais resilientes que permitam reduzir o seu impacto na qualidade de vida dos ocupantes.

A absorção dos materiais depende das suas características e da frequência das ondas sonoras incidentes. Nos materiais porosos, sons a altas frequências resultam num processo adiabático de perda de calor devido ao atrito quando a onda sonora atravessa poros irregulares. Por outro lado, a baixas frequências, estes absorvem o som pela perda de energia causada por trocas de calor, sendo um processo em geral isotérmico. Os materiais porosos apenas funcionam bem a altas frequências (Sagartzazu et al., 2008). Já para as frequências mais baixas, a espessura do material constitui um dos aspetos mais importantes, visto que o comprimento de onda associado irá ser inferior fazendo com que a espessura impeça a sua propagação e a energia absorvida (Limited, 2005).

Em edifícios leves como é o caso dos constituídos por madeira, o isolamento sonoro é muito importante, apresentando estes, em geral, algumas deficiências a esse nível. Particularmente é de notar o isolamento acústico reduzido às baixas frequências. Assim, alguns países, como por exemplo a Suécia, desde 1999, exigem medições e avaliação do desempenho acústico para uma gama de frequências estendida a 50-3150 Hz, ao contrário do que acontece na generalidade dos países onde esta é feita para 100-3150 Hz (Ljunggren et al., 2014).

No que toca ao isolamento sonoro, deve-se ter em conta duas formas de transmissão distintas: sons de condução aérea e sons de condução sólida (percussão). Os sons aéreos são provenientes de vibrações do ar que são originados por uma fonte sonora e a sua origem pode ser tanto do exterior (tráfego aéreo, rodoviário ou ferroviário) como do interior do edifício (som proveniente de equipamentos, conversas e também das atividades realizadas diariamente). A Figura 5 mostra como se processa a transmissão entre compartimentos e entre compartimentos em pisos distintos.

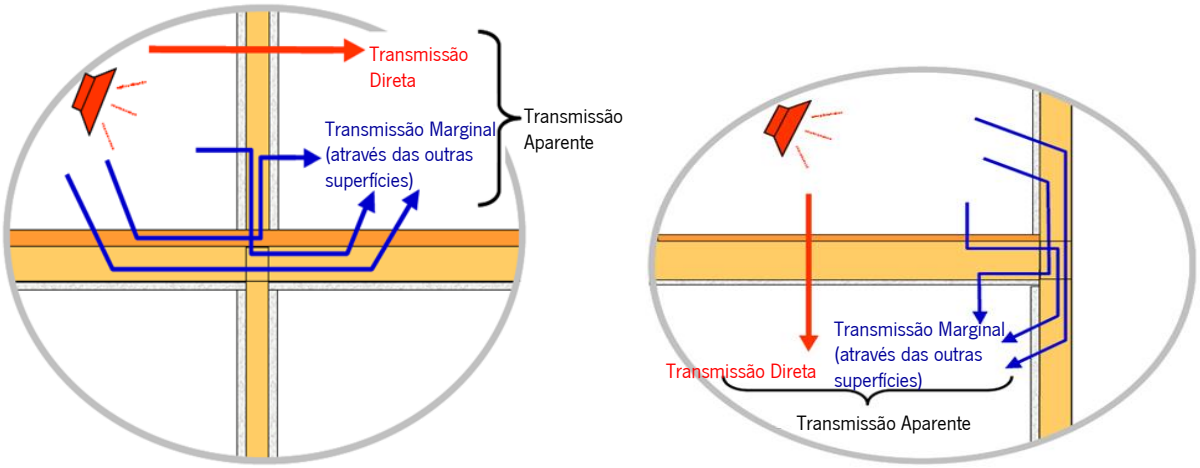



Figura 5 – Transmissão do som entre compartimentos (adaptado de (Quirt et al., 2006))

Em ambas as imagens da Figura 5, o altifalante representa a fonte emissora do som, neste caso sons aéreos e a forma como estes se propagam. A transmissão sonora aparente encontra-se associada à transmissão direta (seta a vermelho) que atravessa diretamente a parede. As setas azúis representam os restantes caminhos por onde o som passa, que são chamadas de transmissão indireta. Para os ocupantes, todas as transmissões são contabilizadas. A transmissão de sons aéreos por via indireta é, em geral, menor do que a direta, apesar de em algumas construções reduzir significativamente o isolamento.

O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), Decreto-Lei nº 96/2008 (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008), apresenta tanto para sons aéreos como de percussão, as exigências que os elementos construtivos devem cumprir. Nas Tabelas 6 e 7, são apresentados os requisitos a cumprir para os diferentes elementos construtivos dos edifícios habitacionais e mistos.

Tabela 6 – Requisitos regulamentares de isolamento sonoro a sons aéreos entre espaços interiores de edifícios habitacionais e mistos (adaptado de (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008))

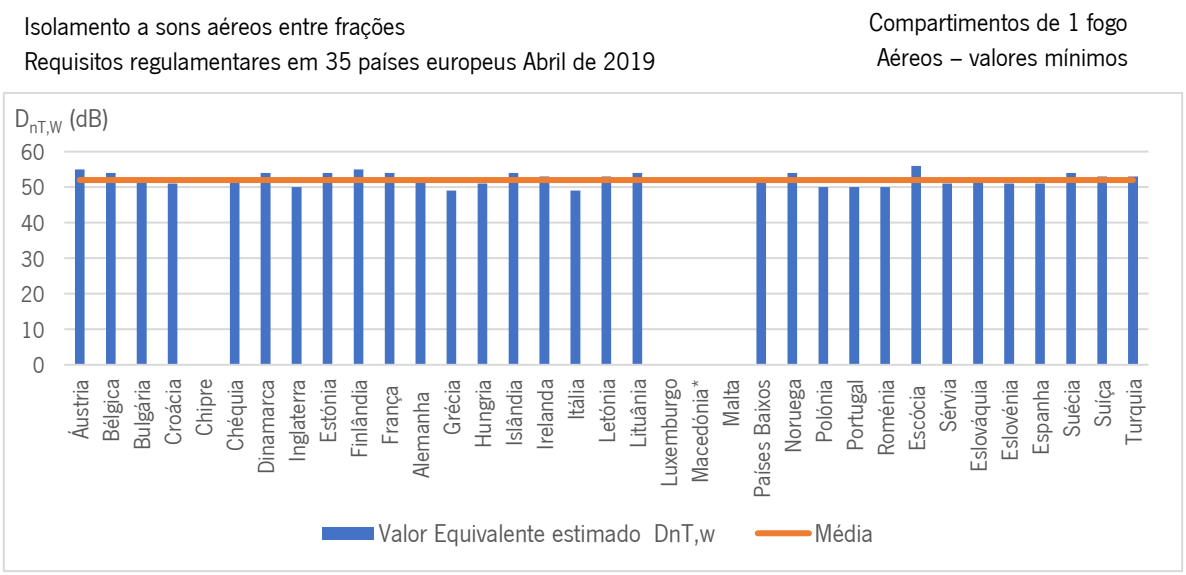
| **Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea, $D_{nT,w}$**<br>**Entre o espaço abaixo indicado (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (receção)** | |
|---|---|
| Compartimentos de um fogo | ≥ 50 dB |
| Locais de circulação do edifício | ≥ 48 dB |
| Garagem de parqueamento | ≥ 50 dB |
| Caminho de circulação automóvel (edifício com elevadores) | ≥ 40 dB |
| Locais de comércio, indústria, serviços ou diversão | ≥ 58 dB |

Tabela 7 – Requisitos regulamentares de isolamento sonoro a sons aéreos entre o exterior e quartos ou zonas de estar de edifícios habitacionais e mistos (adaptado de Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008))

| **Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea, $D_{2m,nT,w}$**<br>**Entre o exterior (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (receção)** | |
|---|---|
| Zonas sensíveis | ≥ 28 |
| Zonas mistas | ≥ 33 |

Na Figura 6 são apresentados os requisitos para o isolamento a sons aéreos para elementos de separação entre habitações de alguns dos 35 países europeus, incluindo Portugal.

Os valores apresentados na Figura 6 são apenas estimados. Uma comparação exata não é possível, uma vez que os valores regulamentares dos diferentes países têm por base índices diferentes. Os valores apresentados na Figura 6 foram resultado de uma transformação efetuada por Rasmussen (2019) que converteu os valores para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado, *in situ* ($D_{nT,w}$), para ser possível comparar os valores. A conversão entre índices implica o conhecimento de dados geométricos, de absorção, pelo que os valores, para espaços convencionais, são aproximados.




Nota: Chipre, Macedónia e Malta não apresentam requisitos regulamentares. O Luxemburgo na maioria das vezes segue os requisitos regulamentares da Bélgica ou de países vizinhos, dependendo do consultor.
*Antiga Jugoslávia

Figura 6 – Requisitos regulamentares do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre frações (valores em abril de 2019). Representação gráfica de valores equivalentes estimados do $D_{nT,w}$ (adaptado de (Rasmussen, 2019))

Analisando os dados da tabela, Portugal é um dos países que apresenta menor nível de exigência em relação ao isolamento a sons aéreos, estando abaixo da média (52 dB). Os países nórdicos, são, em geral, os mais exigentes sendo de destacar a Noruega, Finlândia e Estónia.

Os sons de percussão são originados a partir do choque entre dois corpos, por exemplo, os passos, arrastar cadeiras e deixar cair objetos. A Figura 7 mostra como se processa a transmissão de sons de percussão, transmitidos através do pavimento e entre compartimentos (Quirt et al., 2006). As setas indicam, para o caso de elementos de separação entre frações, a transmissão direta e também a transmissão na ligação entre o pavimento e a parede. Entre compartimentos, existem diversos caminhos por onde o som é transmitido, entre parede e pavimento ou entre pavimentos, que devem ser tidos em conta no isolamento a sons de condução por via sólida.

A Tabela 8 apresenta os valores admissíveis para o isolamento a sons de condução sólida, para edifícios habitacionais e mistos, definidos no RRAE para Portugal.

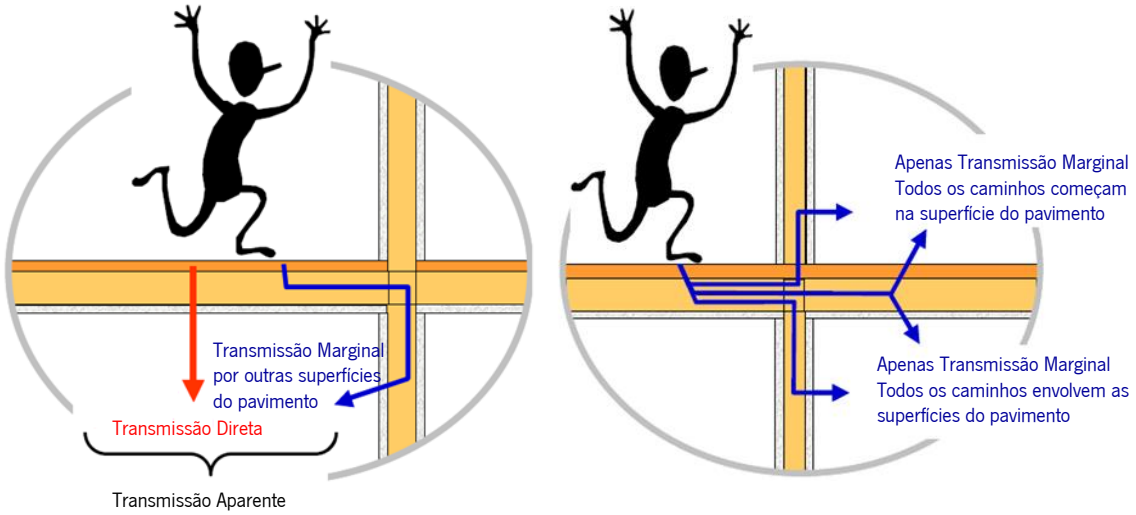



Figura 7 – Transmissão sonora através do pavimento e entre compartimentos (adaptado de (Quirt et al., 2006))

Tabela 8 – Requisitos regulamentares de isolamento sonoro a sons de percussão entre espaços interiores de edifícios habitacionais e mistos (adaptado de (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008))

| **Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Percussão, $L'_{nT,w}$**<br>**Entre o espaço/situação abaixo indicada (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (receção)** | |
|---|---|
| Pavimentos de outros fogos ou locais de circulação comum<br>(excetuando se o local emissor for um caminho de circulação vertical, em edifício servido por ascensores) | ≤ 60 |
| Locais de comércio, indústria, serviços ou diversão | ≤ 50 |

Rasmussen (2019) também compilou os requisitos para o isolamento sonoro a sons de percussão a nível europeu. A Figura 8 apresenta os valores gerais, sendo assumidas as mesmas condicionantes referidas para os sons de condução aérea. Assim, os valores apresentados na Figura 8 são apenas estimados, uma vez que a conversão exata não é possível sem informações relativas aos espaços e elementos construtivos em análise.

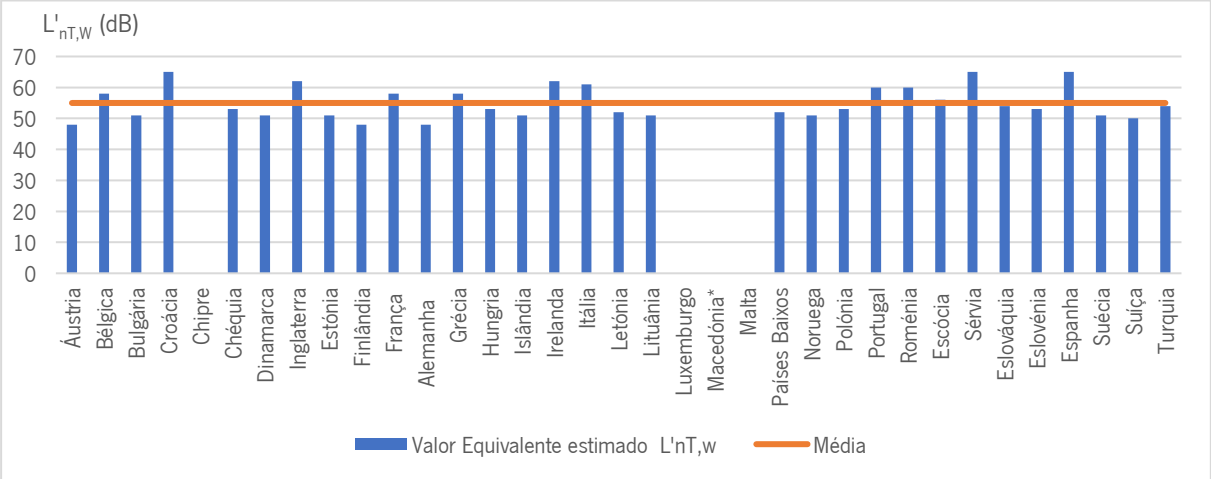
Comparando com Espanha e França, Portugal apresenta um nível de exigência intermédio, sendo a França o país que apresenta valores mais baixos, logo, maior exigência. Tendo em conta a média dos valores obtidos (55 dB) Portugal apresenta menor exigência. Os países nórdicos, neste caso, apresentam os valores mais baixos, logo são também os mais exigentes em relação ao isolamento a sons de percussão. Por outro lado, países como a Sérvia e a Croácia são os que apresentam menores exigências.

Os resultados de um questionário realizado por Liebl et al. (2014) indicam que os ruídos de percussão são os mais impactantes em apartamentos de madeira, neste caso, a circulação dos habitantes vizinhos. No entanto, esta situação é referida tanto para edifícios em madeira como com estrutura em betão. O

isolamento acústico de estruturas de madeira é comparado com o de edifícios em betão pelo mesmo problema.

Isolamento a sons de percussão entre frações
Requisitos regulamentares em 35 países europeus abril de 2019

Compartimentos de 1 fogo
Impacto – valores máximos




Nota: Chipre, Macedónia e Malta não apresentam requisitos regulamentares. O Luxemburgo na maioria das vezes segue os requisitos regulamentares da Bélgica ou de países vizinhos, dependendo do consultor.

*Antiga Jugoslávia

Figura 8 – Requisitos regulamentares do isolamento sonoro a sons de percussão entre frações. Valores em abril de 2019. Representação gráfica de valores equivalentes estimados do $L_{nT,w}$ (adaptado de (Rasmussen, 2019))

Müller et al. (2021) estudaram a diferença de comportamento a baixas frequências comparando tetos em betão e madeira com alguns exemplos de soluções construtivas. Comparando a massa volúmica do betão com a da madeira, as diferenças são consideráveis. O betão apresenta em média uma massa volúmica aparente de cerca de 2600 kg/m$^3$, enquanto a madeira tem valores por volta dos 600 kg/m$^3$, variando conforme a espécie de madeira escolhida. Segundo Müller et al. (2021), este fator conduz ao fraco desempenho acústico da madeira para baixas frequências. É referido que o desempenho acústico dos edifícios em madeira pode ser aumentado tanto pela melhoria do desempenho do pavimento como pela utilização de tetos suspensos (teto falso) ou uma combinação dos dois. No entanto, a melhoria destes aspetos pode aumentar o custo final e também condicionar as vantagens a nível ambiental que as estruturas em madeira oferecem.

Yang et al. (2021) estudaram o comportamento vibro acústico de painéis CLT através da emissão de ondas nos painéis (método da onda e dos elementos finitos), sendo posteriormente analisada a dispersão das curvas e calculadas as quebras de transmissão. Foram testados dois modelos, sendo, no primeiro, considerado um material laminado em que cada camada homogénea é modelada como um sólido

ortotrópico com propriedades constantes. No segundo modelo, o painel CLT é considerado numa única camada homogénea também ortotrópica com propriedades constantes (Yang et al., 2021). Os resultados para baixas frequência demonstraram que a placa CLT se comporta como material ortotrópico para três tipos de onda típicos: flexão (com cisalhamento transversal significativo), cisalhamento no plano e ondas extensas no plano. Para altas frequências, as ondas de frequências superiores propagam-se. O comportamento foi diferenciado em ambos os modelos. Apesar da transmissão de sons aéreos ter sido dominada para algumas ondas (ondas com deslocamento transversal significativo das superfícies), outros modos de onda (cisalhamento ou extensão no plano) podem contribuir significativamente para a transmissão a nível estrutural (Yang et al., 2021).

Logo, torna-se importante incorporar materiais absorventes sonoros e elementos resilientes nos elementos construtivos em madeira de modo a assegurar o desempenho térmico, tendo, sobretudo, em conta a melhoria do desempenho acústico. Na secção seguinte, apresentam-se diversas opções de soluções construtivas utilizadas (ou possíveis de utilizar) em edifícios em madeira.

## 2.3 Soluções construtivas usadas em edifícios em madeira

Neste subcapítulo serão referidos alguns exemplos de soluções construtivas que são utilizadas em edifícios em madeira, em elementos de parede e de laje, com a caracterização do desempenho térmico em alguns estudos e desempenho acústico noutros. Alguns desenhos das soluções construtivas foram desenvolvidas no programa *Autocad* de forma a facilitar a compreensão das diversas camadas utilizadas (Autodesk, 2023).

### 2.3.1 Paredes

No que toca à utilização de EPS, Evola et al. (2019) compararam o comportamento térmico e acústico de uma estrutura de madeira para casas geminadas construídas na Sicília (sul de Itália) com a incorporação deste material ou de fardos de palha em paredes exteriores. A estrutura dos edifícios é de madeira com vigas de fundação em betão armado. As paredes exteriores são constituídas por, do exterior para o interior, com as respetivas espessuras: painel de pedra artificial (25 mm), pregos de madeira para a sua instalação (20 mm), isolamento termo-acústico (200 mm), caixa de ar com montantes em alumínio

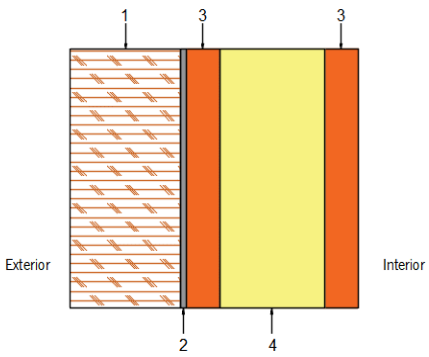
(27 mm) e painel de gesso cartonado (18 mm). Foi avaliado o índice de redução sonora aparente e o tempo de reverberação numa sala. A fonte sonora foi colocada numa posição fixa, sendo o microfone colocado em 6 posições distintas. As medições foram realizadas para bandas de oitava para frequências entre 125-2000 Hz. Não foram medidas as frequências abaixo dos 100 Hz pois o volume da sala era superior a 25 $m^3$. Apesar do melhor comportamento do EPS a nível do isolamento térmico, este é um material sem contributo para o isolamento acústico, tendo a parede isolada com fardos de palha um índice de redução sonora aparente ($R'_w$) cerca de 10 dB superior ao da parede com EPS, sendo possível a melhoria da sua prestação com a colocação de 2 placas de gesso cartonado (12,5 mm) de ambos os lados da parede (Evola et al., 2019).

Na análise de diversos materiais absorventes, Chang et al. (2021) estudaram o desempenho hidrotérmico de paredes constituídas por painéis CLT e contraplacado de madeira aplicada no núcleo em construções modulares, tendo em conta previsões climáticas futuras em oito cidades americanas. As soluções construtivas para o caso de estudo apresentavam a seguinte constituição (do interior para o exterior, com respetivas espessuras): painel CLT de aglomerado de madeira (120 mm), membrana resistente ao vapor (1 mm), material de isolamento (80 mm), caixa de ar (20 mm) e revestimento de madeira (10 mm). Chang et al. (2021) consideraram como materiais de isolamento térmico poliestireno extrudido (XPS), EPS, lã mineral e fibras de madeira. Todos os materiais de isolamento tiveram por base a mesma condutibilidade térmica, 0,34 W/(m.K), sendo avaliado a sua resistência à humidade (crescimento de fungos e bolores) e temperatura. Foram estudadas 3 situações climáticas diferentes sendo elas o passado[2], em 2050 e 2080 considerando uma rápida mudança climática. A análise de resultados mostrou que para os diferentes climas dos Estados Unidos considerados e as diversas datas temporais, o XPS foi o material que apresentou melhor desempenho em relação à presença de fungos para todas as situações climáticas nas diferentes cidades americanas estudadas. As soluções com EPS e fibras de madeira foram as mais suscetíveis às mudanças climáticas futuras. A lã mineral foi o material de isolamento térmico que apresentou mais problemas em relação à humidade, sendo o menos recomendado (Chang et al., 2021).

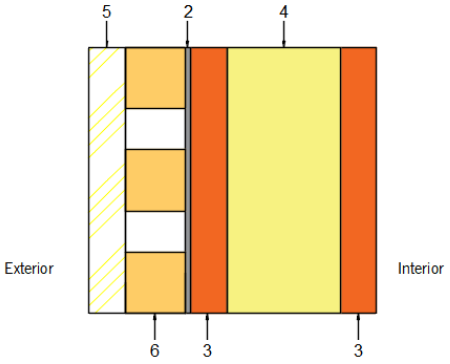
Fu et al. (2020) avaliaram do comportamento hidrotérmico de diferentes revestimentos em paredes exteriores em *timber frame*. O estudo realizado teve por base análises *in situ* para a obtenção dos coeficientes de transmissão térmica, sendo o desempenho térmico estudado de forma regular. Foi também realizada uma simulação para prever as mudanças de temperatura, humidade relativa e teor

[2] Condições climáticas relativas aos últimos 30 anos, não considerando as alterações climáticas.

de humidade das paredes exteriores para aumentar o rigor da análise. Os materiais utilizados incluem aglomerado de cortiça expandida [ICB], pilar de abeto (secção 38 mm x 89 mm) e isolamento de fibra de vidro, OSB, placa de pinho tratado, ripa e membrana impermeável. A Figura 9 representa a caracterização de ambas as paredes em estudo.




Parede Exterior do Edifício A




Parede Exterior do Edifício B

1 – Placa de cortiça 40 mm
2 – Membrana impermeável 2 mm
3 – Placa OSB 12 mm
4 – Pilar de abeto e isolamento de fibra de vidro
5 – Placa de pinho tratada 12 mm
6 – Ripa de 20X20 mm (caixa de ar)

Figura 9 – Esquema estrutural das paredes exteriores analisadas (adaptado de (Fu et al., 2020))

Os valores medidos tanto no local como obtidos através de simulação para a condutibilidade térmica de ambas as paredes mostraram que o valor do coeficiente de transmissão térmica para o edifício "A" foi menor do que o obtido para o "B", significando que o isolamento térmico da solução "A" é superior. As soluções definidas são aplicáveis em climas severamente frios.

Um dos exemplos de uso de materiais naturais em construções em madeira foi o uso de betão de cânhamo na reabilitação de edifícios históricos na Suécia, compostos por montantes e ripas, estudado por Strandberg-de Bruijn et al. (2019). Na reabilitação, as ripas de madeira foram preservadas assim como a camada interna de argamassa de cal, tal como mostra a Figura 10.

O objetivo pretendido era o de melhorar o desempenho energético e adicionalmente a transmissão térmica e amortecimento térmico. Os testes efetuados, através de medições *in situ*, foram realizados durante um ano para o estudo da energia usada para aquecimento. A parede de teste "A" (antes da reabilitação) apresenta na sua constituição (do interior para o exterior, com as respetivas espessuras): revestimento interior em papel de parede, estrutura em montantes e ripas com duas pranchas de 50 mm, reboco de cal (80 mm) sobre ripas de madeira (30x36 mm) dispostas na diagonal, com aproximadamente 200 mm de distância entre elas e reboco de cal (20 mm). A parede "B" (após

reabilitação) é similar à parede "A" mudando a apenas a utilização de reboco de betão de cânhamo (90 mm) na terceira camada substituindo o reboco de cal.



Figura 10 – Estrutura exposta de parede em montantes e ripas em moradia em Visby, em renovação, reabilitada em 2003 (Strandberg-de Bruijn, Donarelli & Balksten, 2019)

Strandberg-de Bruijn et al. (2019) referem que os materiais usados convencionalmente, como lã mineral ou EPS, poderiam apresentar melhores resultados em termos de eficiência energética das paredes, no entanto, não permitem a difusão (como os materiais porosos), impedindo que a humidade atravesse as paredes. Esse fator pode levar à ocorrência de danos em paredes reabilitadas. A parede "B" com cal de cânhamo apresentou valores mais baixos de transmissão térmica (U inferior), sendo a melhor solução, com reduções tanto na transmissão térmica como nos gastos energéticos (medidos *in situ* ). A preservação das ripas de madeira também foi realçada, algo que não seria possível com a utilização de placas de lã mineral ou EPS. Strandberg-de Bruijn et al. (2019) referem o facto de a solução com cal com cânhamo apresentar melhores resultados e a obtenção de temperaturas mais estáveis no edifício com uma regulação mais eficaz da humidade no caso de reabilitações.

O uso de celulose como material granular de enchimento solto constituído por papel reciclado como material de isolamento térmico em soluções construtivas em madeira foi investigado por Nicolajsen (2005). O estudo teve a duração de um ano, de modo a analisar o comportamento em todas as estações. A parede com isolamento de celulose tinha como camadas e respetiva espessura (do interior para o exterior): placa de gesso cartonado (13 mm), membrana pára-vapor, enchimento em celulose (285 mm), placa de gesso cartonado (9 mm), caixa de ar (25 mm) e revestimento em tábua de pinho (19 mm). Já a parede constituída por lã de rocha apresentava: placa de gesso cartonado (13 mm), lã de rocha (45 mm), placa de gesso cartonado (13 mm), membrana pára-vapor, lã de rocha (240 mm) sendo similar à anterior nas restantes camadas. Foi estabelecida uma comparação entre a utilização de lã de rocha e

celulose. O desempenho térmico da parede com celulose foi inferior ao da parede com lã de rocha, sendo a humidade um fator limitativo (Nicolajsen, 2005).

O estudo de soluções de isolamento térmico em paredes em estrutura de madeira realizado em edifícios *passive houses* (habitações com nível elevado de isolamento térmico das paredes exteriores) foi realizado por Georgescu et al. (2022) utilizando diversos materiais (resíduos de acrilonitrila butadieno estireno (ABS), lã de ovelha, fibra de madeira, cana e papel reciclado). A parede estudada era constituída por (do interior para o exterior com as respetivas espessuras): placa de gesso cartonado (12 mm), folha de alumínio como barreira pára-vapor (0,2 mm), material de isolamento térmico e placa de OSB (12,5 mm) (Georgescu et al., 2022). Foram efetuadas medições para tanto em laboratório como *in situ* para as diferentes paredes. Os investigadores concluíram que, apesar da boa prestação destes materiais relativamente ao isolamento térmico e a nível ambiental, possuem aspetos negativos, dando como exemplo o seu comportamento higroscópico, baixa resistência a fungos e ao fogo, que limitam o seu uso, e obrigando ao seu tratamento.

Outro estudo que se destaca foi o realizado por Danovska et al. (2022) que analisaram em que extensão a norma EN ISO 10456:2007[3] (CEN 2007), para uma condutibilidade térmica constante, tem impacto no cálculo da transferência de calor ao longo de paredes e coberturas de madeira em zonas climáticas italianas. Foram realizadas simulações através de programas de cálculo e entre os materiais foram usados painéis CLT e painéis de isolamento derivados da madeira (fibras de madeira e partículas de madeira). As simulações foram realizadas tendo em conta quatros condições distintas. A condição um assume uma condutibilidade térmica constante de acordo com a norma EN ISO 10456:2007 (CEN 2007) para uma temperatura de 10 °C e humidade equivalente à apresentada para uma temperatura de 23 °C e 50% de humidade relativa, a condição dois assume uma condutibilidade térmica constante de acordo com a temperatura média anual de cada local, a condição três define também uma condutibilidade térmica constante para cada mês assumindo 12 valores, dependendo das condições meteorológicas médias de cada mês especifico, e por último a condição quatro que usa valores dinâmicos da condutibilidade térmica de acordo com as funções derivadas da atividade experimental

[3] A EN ISO 10456:2007 especifica métodos para a determinação de valores térmicos declarados e de projeto para materiais e produtos de construção termicamente homogéneos, e procedimentos para converter valores obtidos sob um conjunto de condições para os válidos para outro conjunto de condições (-30 °C e +60 °C). Fornece coeficientes de conversão para temperatura e humidade válidos para temperaturas médias entre 0 °C e 30 °C. Também fornece dados de projeto em formato tabular para utilização em cálculos de transferência de calor e humidade, para materiais e produtos termicamente homogéneos normalmente utilizados na construção civil.

(Danovska et al., 2022). Os fluxos de calor foram comparados assim como os desvios energéticos acumulados. A Figura 11 apresenta as soluções de paredes e coberturas estudadas.

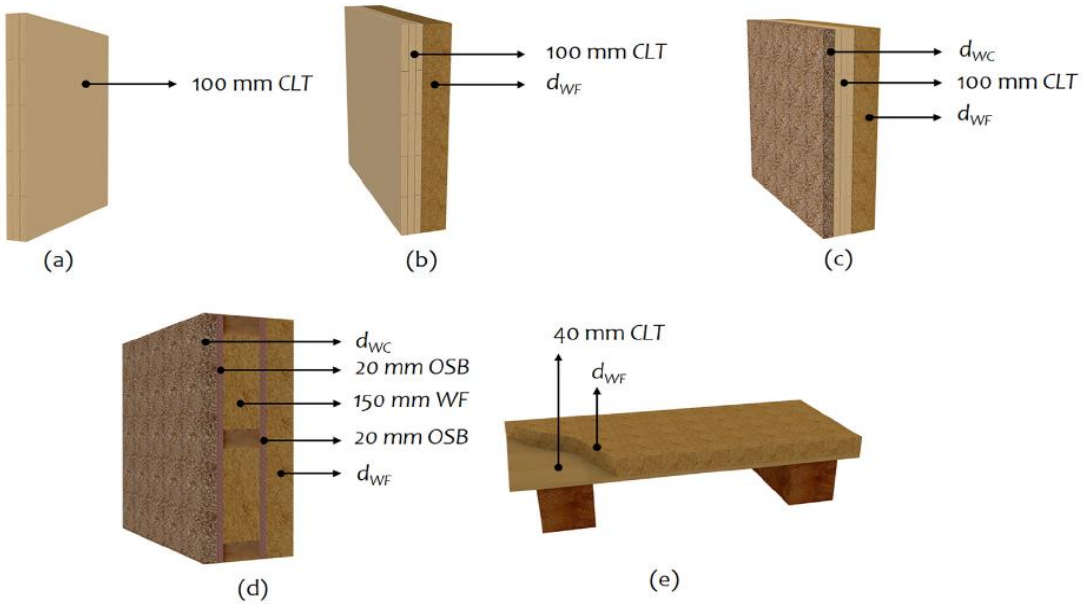



Figura 11 – Soluções estruturais estudadas: (a) parede CLT de referência, (b) parede CLT com isolamento, (c) parede maciça CLT, (d) parede em estrutura de madeira e (e) cobertura horizontal isolada (o lado interior encontra-se do lado esquerdo ou inferiormente, respetivamente) (Danovska et al., 2022)

A Tabela 9 apresenta a constituição (em mm) das camadas das paredes estudadas, sendo $d_{WC}$ a espessura da placa de partículas de madeira e $d_{WF}$ a espessura da placa de fibras de madeira. Referencia-se também as zonas climáticas em Itália onde são utilizadas e o coeficiente de transmissão térmica associado.

Tabela 9 – Composição das paredes e da cobertura. $d_{tot}$ indica a espessura total do elemento e U (W m$^{-2}$ K$^{-1}$) representa o coeficiente de transmissão térmica do elemento considerando os coeficientes de transferência de calor de acordo com a EN ISO 6946:2017 (adaptado de (Danovska et al., 2022))

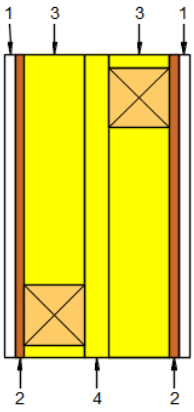
| Solução Construtiva | | Zona Climática em Itália | $d_{WC}$ (mm) | $d_{WF}$ (mm) | $d_{tot}$ (mm) | U (W m$^{-2}$ K$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| (a) Parede CLT referência | | - | - | - | 100 | 0,88 |
| (b) Parede CLT isolada | | B | - | 60 | 160 | 0,36 |
| | | E | - | 200 | 300 | 0,15 |
| (c) Parede maciça CLT | | B | 50 | 150 | 300 | 0,16 |
| | | E | 100 | 150 | 350 | 0,14 |
| (d) Parede em estrutura de madeira | (i) Pouco isolamento | B | - | 0 | 190 | 0,21 |
| | | E | - | 0 | 290 | 0,14 |
| | (ii) Altamente isolado | B | 40 | 0 | 230 | 0,18 |
| | | E | 80 | 100 | 370 | 0,11 |
| (e) Cobertura horizontal | | B | - | 120 | 160 | 0,27 |
| | | E | - | 200 | 240 | 0,17 |

As soluções construtivas foram analisadas em cidade localizadas em duas zonas climáticas italianas, sendo elas Crotone e Calabria localizadas numa zona de clima quente e húmido, Saint Cristophe e Valle D'Aosta, localizadas numa região de clima frio e seco (Danovska et al., 2022). Após a realização da atividade experimental, os investigadores constataram que a condutibilidade térmica aumenta com o aumento da temperatura média (+10,2% para o CLT, +26% para o painel de partículas de madeira e +21% para o painel de fibras de madeira, para variação da temperatura de 10°C para 45-50 °C), o mesmo acontecendo para o aumento da humidade (+12% para o CLT, +18% para o painel de partículas de madeira e +8% para o painel de fibras de madeira de níveis baixos para altos de humidade), sendo que para o aumento da temperatura uma função linear é a mais precisa e a quadrática ajusta-se melhor à evolução do aumento da humidade (Danovska et al., 2022). Nas simulações considerando o clima mediterrânio (quente e húmido), os investigadores concluíram que a EN ISO 10456:2007 (CEN 2007), para uma condutibilidade térmica constante, foi subestimada, ocorrendo uma sobrestimação para os fluxos de calor calculados para o clima frio e seco. Para os elementos verticais (paredes) concluíram que a orientação e a absorção solar da superfície externa têm um papel fundamental no desvio entre os modelos estudados, sendo significativamente inferior em clima frio e seco em que ocorre de forma similar para os elementos horizontais. Já no clima quente e húmido os elementos horizontais apresentam maior variação de resultados entre modelos (Danovska et al., 2022).

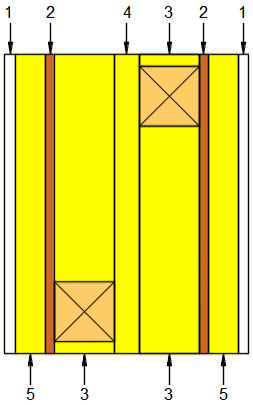
Tendo como intenção analisar o isolamento acústico de estruturas leves em madeira, com ênfase nas baixas frequências, Muellner et al. (2008) estudaram o comportamento de paredes e lajes. No que diz respeito a paredes, foi analisado o desempenho de duas soluções de separação entre frações, diferenciando-as o uso de elemento resiliente. A Figura 12 apresenta as paredes e a respetiva constituição.

A Figura 13 apresenta o índice de redução sonoro obtido para ambas as paredes e os valores das correções aplicadas em ambos os casos.

Os investigadores referem que apesar do uso de camada resiliente ser eficaz em estruturas pesadas, como as formadas por betão e tijolo quando dimensionado de forma apropriada, o mesmo não acontece em estruturas leves. O exemplo mostra que esta solução em paredes convencionais de madeira para separação de frações leva a uma descida considerável do índice de redução sonora ($R_w$) na gama de frequências entre os 50-100 Hz.




Parede dupla sem elemento resiliente




Parede dupla com elemento resiliente

1 – Placa de gesso cartonado 18 mm
2 – Placa de partículas de madeira 15 mm
3 – Estrutura de madeira, lã mineral 100 mm
4 – Lã mineral 40 mm
5 – Elemento resiliente, lã mineral 50 mm

Figura 12 – Paredes duplas sem e com elemento resiliente (adaptado de (Muellner et al., 2008))

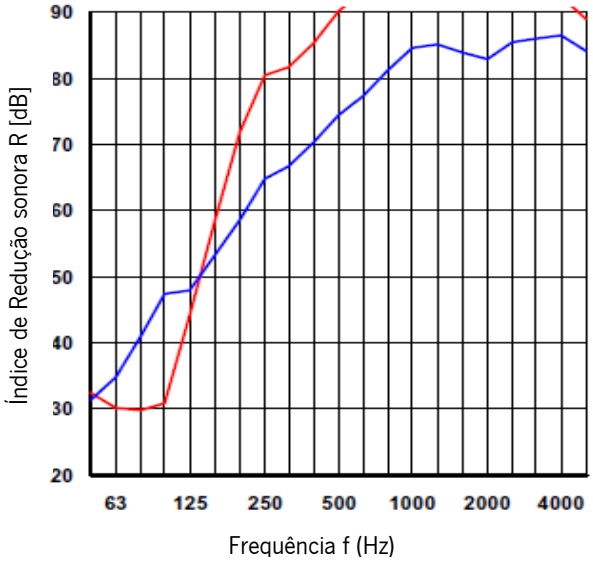
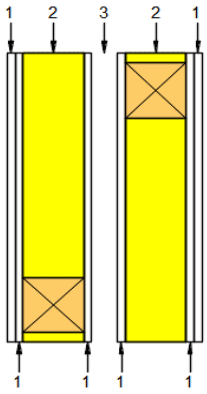


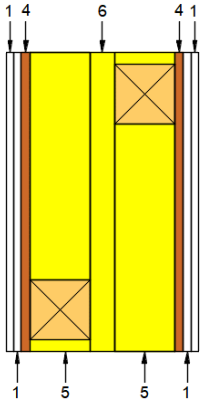

Figura 13 – Índice de redução sonora de paredes duplas de madeira com e sem elemento resiliente (adaptado de (Muellner et al., 2008))

Foram também testadas três paredes duplas de separação entre frações, utilizadas de forma recorrente tanto em edifícios em altura como térreos. A Figura 14 mostra a constituição das paredes estudadas.



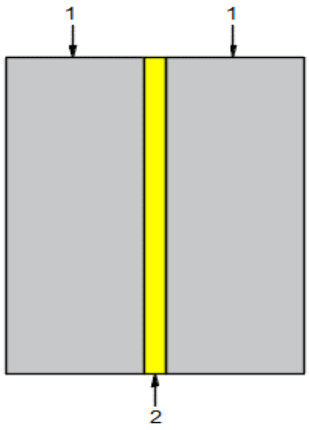

Parede dupla tradicional em estrutura de madeira

1 – Placa de gesso cartonado 12,5 mm
2 – Estrutura de madeira, lã mineral 95 m
3 – Caixa de ar 40 mm




Parede dupla de separação de frações em estrutura de madeira

4 – Placa de partículas de madeira 15 mm
5 – Estrutura de madeira envolvida em lã mineral 100 mm
6 – Lã mineral 40 mm




1 – Blocos de betão 180 mm
2 – Lã Mineral 30 mm

Parede dupla de betão

Figura 14 – Exemplos de paredes de separação entre frações leves e em blocos de betão (adaptado de (Muellner et al., 2008))

A Figura 15 apresenta os resultados obtidos para as três soluções estudadas relativamente ao seu índice de redução sonora.

Os resultados mostram que uma solução em madeira para uma parede entre frações pode ser competitiva quando comparada com uma parede dupla de betão, só sendo possível com a utilização de camadas que aumentem a massa da solução construtiva, e se de acordo com a construção, um sistema de ressonância múltipla puder ser evitado, a ressonância torna-se semelhante a uma parede dupla de betão (Muellner et al., 2008).

No Anexo 1 são apresentadas algumas soluções construtivas de paredes com os respetivos valores do índice de redução sonora das soluções e coeficiente de transmissão térmica conforme as condutibilidades térmicas dos materiais presentes no ITE-50 (Dos Santos et al., 2006).

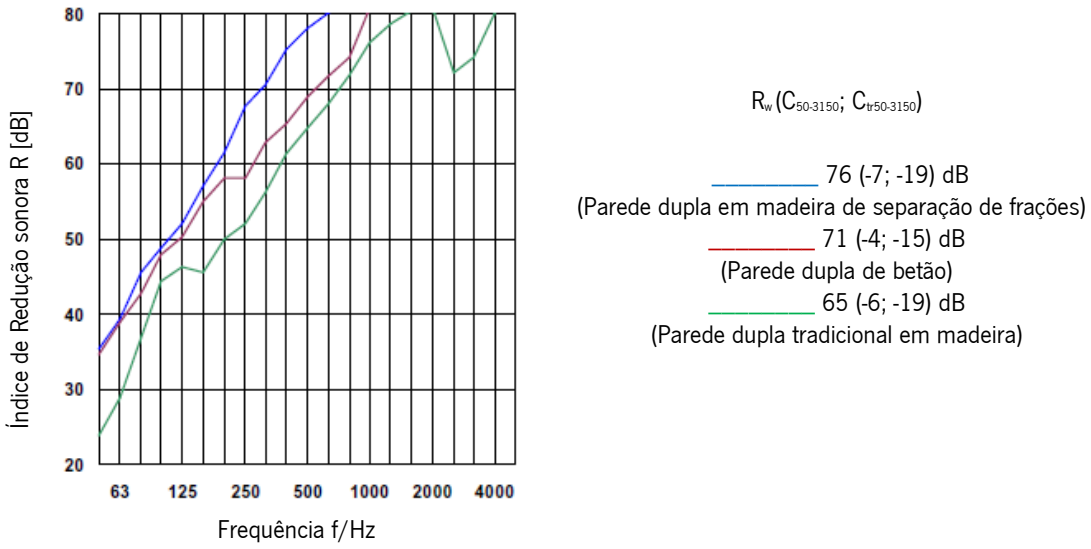



Figura 15 – Índice de redução sonora das paredes duplas de repartição de frações leves e maciça (adaptado de (Muellner et al., 2008))

### 2.3.1.1 Influência das portas e janelas no isolamento térmico e acústico em edifícios

Portas são elementos dos edifícios responsáveis pelo acesso entre divisões ou entre o interior e o exterior dos edifícios. As suas características estão associadas tanto ao isolamento térmico como acústico dos elementos construtivos dos quais fazem parte, sendo que a nível térmico afeta as trocas de calor entre locais, e, a nível acústico, constitui um elemento que pode ser uma barreira à propagação do som. São formadas por diversos elementos sendo de destacar a folha (em geral uma ou duas), batente, aro e a sua caixilharia. Os elementos mais comuns usados são aço, alumínio, madeira, sendo também o uso de vidros recorrente. Quanto à sua caracterização, podem ser de abrir, de correr, pivotante (roda em torno de eixo vertical), basculante (roda em torno de eixo horizontal).

Este elemento, em conjunto com os vãos envidraçados (janelas e portas envidraçadas), é considerado um dos elementos mais débeis ao nível do isolamento acústico entre espaços, devendo ser tida em atenção a sua conceção para a melhor prestação possível.

No seu estudo, dividido em duas partes, Hongisto (2000) estudou o desempenho acústico de diferentes soluções de portas. Os efeitos causados pelas frinchas entre a porta e a parede foi também estudado. As configurações dos vãos opacos em estudo foram as seguintes: folha dupla separada por caixa de ar, folha dupla com conexões rígidas, folha dupla sem espaço de ar e painel sanduiche (isolamento em lã

mineral). Hongisto et al. (2000) investigaram o comportamento em relação ao isolamento sonoro de nove soluções de portas em aço e outras tantas em madeira. Os elementos que apresentaram índices de redução sonora mais elevados foram os que apresentavam painel duplo sem conexões entre painéis. O espaço entre os painéis utilizados foi preenchido com material de absorção sonora que permitiu a não ligação rígida entre estes. A melhoria do índice de redução sonora foi de 8-10 dB comparando aos elementos constituídos por conexão rígida com a mesma massa.

De forma a obter o isolamento acústico conferido por janelas, portas entre outros elementos, Baldinelli et al. (2013) efetuaram medições em laboratório. As portas utilizadas nos ensaios eram constituídas por madeira sem superfícies transparentes, sendo estudados dois modelos de portas. Inicialmente, foi testada uma porta de duas folhas e de seguida foi testada uma porta de uma folha, sendo a estrutura a mesma. Verificou-se, que no primeiro modelo, a zona critica se situou entre folhas da porta, na banda de frequências de 1/3 de oitava, entre os 1000 e 2000 Hz. O efeito da junção (e mau comportamento da folha de menores dimensões) centra-se na faixa 1000-2000 Hz onde se notou uma significativa diminuição do desempenho acústico. Nos 2000 Hz, foi reconhecível a transmissão associada à frincha existente na zona inferior da porta. A repetição do teste para o segundo modelo confirmou o previsto, tendo ocorrido um aumento de 4 dB no índice de redução sonora e o desaparecimento das pontes acústicas.

Logo, o uso de portas de uma folha é a melhor solução ao nível do isolamento acústico sendo a correta instalação destes elementos fundamental para diminuir a presença de locais que permitam a propagação do som. É também necessária uma correta vedação perimetral, de modo a reduzir as infiltrações de ar e pontes acústicas (Yuya et al., 2010).

As janelas (vãos envidraçados) assumem-se como um dos principais elementos da envolvente dos edifícios. As funções asseguradas pelas janelas dividem-se em duas fundamentais: separação de zonas onde as pessoas vivem, trabalham ou relaxam de outros ambientes e também a de assegurar a continuidade visual para o ambiente exterior, deixando entrar a luz natural, para além de se destacar a sua abertura para a ventilação dos espaços interiores dos edifícios e consequente melhoria tanto da qualidade do ar como da temperatura. Um bom desenho dos seus diferentes componentes (caixilho, revestimentos, vidros e juntas), assim como uma correta conexão entre eles promove o seu bom desempenho (Baldinelli et al., 2014).

Janelas com valores baixos do coeficiente de transmissão térmica podem reduzir substancialmente as perdas de energia e, consequentemente reduzir os gastos com equipamentos para aquecimento e/ou

arrefecimento nos edifícios. Os regulamentos térmicos em diversos países têm sido cada vez mais restritivos, exigindo valores de U cada vez mais baixos (Jelle et al., 2012).

Nas janelas, a parte envidraçada é a mais importante (Jelle et al., 2012). No cálculo global do U para as janelas, o vidro destaca-se visto ser frequentemente o elemento que apresenta maior área (Gustavsen et al., 2008).

As janelas podem ser de vidro simples, duplo ou triplo, sendo as de vidro triplo as que apresentam o valor de coeficiente de transmissão térmica mais baixo. O vidro simples atualmente é o menos utilizado, tendo um muito baixo desempenho acústico (pouca massa e consequente baixo nível de redução sonoro), o vidro triplo é uma opção, em geral, significativamente mais cara, sendo a opção pelo vidro duplo a melhor para climas temperados (Baldinelli et al., 2014).

O estudo de diversas soluções de janelas foi realizado por Jelle et al. (2012). A solução de vidro triplo é a que permite a obtenção de valores mais baixos do U. Os valores mais baixos são possíveis graças ao preenchimento com árgon e crípton principalmente. Outras vantagens são obtidas, como a diminuição da massa da janela resultando numa caixilharia da janela mais fina (Jelle et al., 2012).

Outro componente que se destaca na eficiência das janelas é a sua caixilharia. Existem vários materiais utilizados em que se incluem a madeira (incorporando poliuretano), alumínio, aço, PVC, entre outros. A conexão das caixilharias nos elementos de parede torna-se importante também na melhoria da sua eficiência energética (Jelle et al., 2012).

Baldinelli et al. (2013) apresentaram resultados de dois casos de estudo no que toca à intensidade sonora em janelas. No primeiro caso, foi usada uma janela com caixa de estores e a análise efetuada mostrou níveis de intensidade sonora mais elevados nas ligações entre a caixilharia da janela e a parede de alvenaria que a suportava. A Figura 16 apresenta a janela em teste e os resultados da intensidade sonora.

Após discussão entre projetistas e instaladores, foram feitas alterações na conexão entre a parede e as janelas. Seguidamente foi efetuada a segunda medição e obtiveram-se valores cerca de 1-2 dB melhores na zona de frequências de 300 Hz. O efeito nas ligações entre a caixilharia da janela e a parede de alvenaria realizado no primeiro caso de estudo foi considerado residual pelos investigadores.

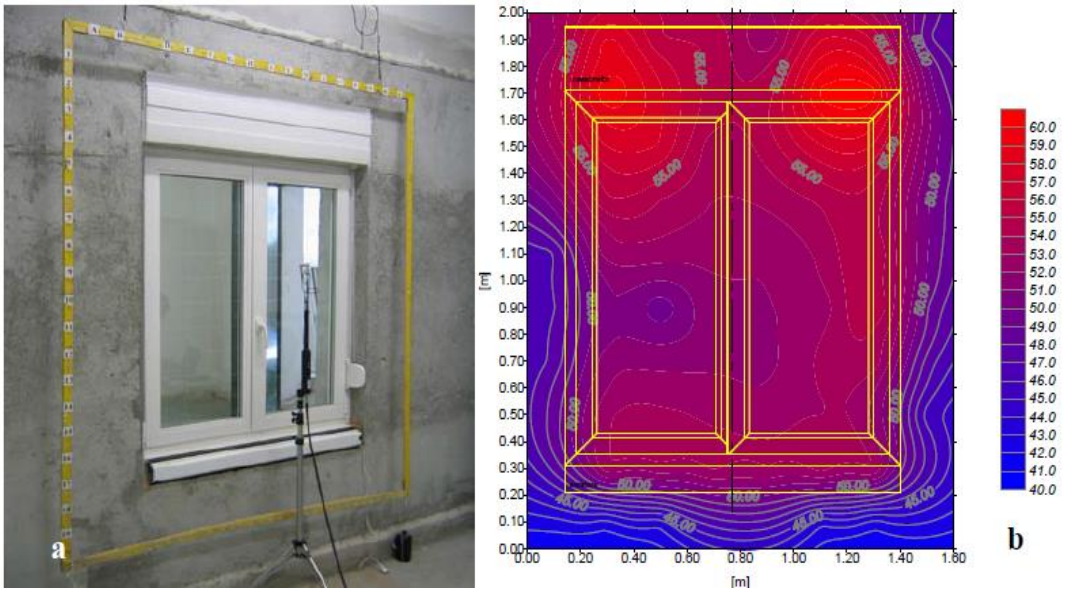



Figura 16 – Primeiro estudo de caso. a: visualização da amostra testada completa da grade utilizada para colocação da sonda nas posições de medição. b: mapa de nível de intensidade sonora antes das melhorias na instalação. Legenda à direita refere o nível de intensidade sonora em dB (Baldinelli et al., 2013)

No segundo caso de estudo foi analisada uma janela sem caixa de estores, sendo este um componente critico no isolamento acústico. Neste caso, o valor do índice de redução sonora medido foi abaixo do esperado (38 dB). Os caixilhos apresentaram dimensão inferior (cerca de 6 mm) aos considerados no projeto, não sido bem realizada a aderência ao quadro. A segunda medição foi realizada com a substituição da folha da janela por uma com medidas adequadas. Os resultados mostraram uma melhoria de 2-4 dB em toda a banda de frequências examinada. O mesmo aconteceu no que toca ao índice de redução sonora que passou de 38 dB para 41 dB.

Outro fator que pode conduzir à perda de isolamento sonoro em janelas ocorre nos elementos de caixilharia, com o envelhecimento dos vedantes, abertura de fissuras entre outros aspetos como a degradação dos materiais, sendo prejudicado o isolamento em relação ao existente inicialmente em 1 a 2 dB (Patrício, 2018).

Concluindo, no caso das janelas, torna-se importante a escolha do vidro a utilizar, sendo o vidro duplo a solução mais adequada para climas temperados, uma caixilharia de qualidade e também a sua correta instalação e manutenção de todos os seus componentes, de forma a diminuir a presença de frinchas e a consequente melhoria do isolamento térmico e acústico.

### 2.3.2 Lajes

Um estudo realizado por Santos et al. (2021) teve como um dos principais objetivos o estudo do desempenho térmico e acústico (sons aéreos e de percussão) de várias soluções de laje em CLT, incluindo painéis CIT com o uso de poliuretano como camada de isolamento. A espessura de poliuretano utilizado foi de cerca de 30 mm sendo este material colocado na camada intermédia das camadas convencionais dos painéis CLT, como mostra Figura 17.

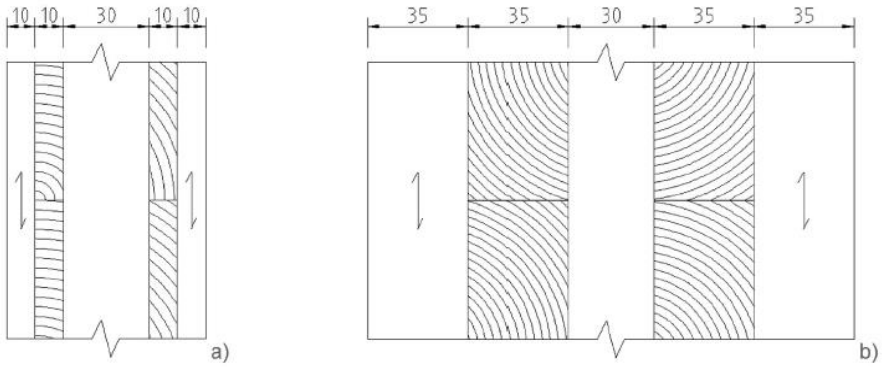



Figura 17 – Corte transversal dos painéis CIT estudados com espessuras: a) 70 mm; b) 170 mm (Santos et al., 2021)

Os resultados dos testes relativos ao isolamento a sons aéreos mostraram a sua insuficiência para cumprir os requisitos definidos no regulamento português, sendo as soluções até menos eficazes dos que a solução CLT sem isolamento. O mesmo ocorreu para os sons de percussão. Já no que toca ao isolamento térmico, os painéis CIT tiveram um comportamento mais satisfatório, permitindo aos investigadores concluir que uma boa configuração pode facilmente permitir o cumprimento dos requisitos definidos nos regulamentos portugueses (Santos et al., 2021).

Bettarello et al. (2021), estudaram o isolamento acústico de laje com o objetivo de determinar parametricamente a influência de diferentes camadas na redução da transmissão dos ruídos aéreos e de percussão, assim como perceber se modelos analíticos poderiam prever os valores medidos. Os testes foram realizados *in situ* utilizando máquina de passos e bola de borracha para isolamento a sons de impacto e uma fonte dodecaédrica (fonte omnidirecional) para sons aéreos num edifício teste constituído por 5 lajes CLT com paredes em estrutura de madeira. Na Tabela 10, apresentam-se os materiais usados com a caracterização da sua espessura, densidade e elasticidade.

Tabela 10 – Descrição dos elementos utilizados na laje (adaptado de (Bettarello et al., 2021))

| Elemento | Espessura d (mm) | Densidade ρ [kg/m³] | Rigidez Dinâmica s' [Mn/m³] |
|---|---|---|---|
| Betonilha 1 | 40 | 1150 | - |
| Camada Resiliente | 9 | 700 | 11 |
| Betonilha 2 | 100 | 400 | - |
| Membrana pára-vapor | 0,2 | 33 | - |
| Painel de laje CLT | 180 | 470 | - |
| Caixa de ar | 62 | 1 | - |
| Lã de rocha | 60 | 70 | - |
| Placa de gesso cartonado | 12,5 | 730 | - |

Foram testadas quatro configurações distintas de lajes em CLT. A Figura 18 apresenta a 1° configuração constituída somente pelo pavimento em CLT sem camadas de isolamento.




Figura 18 – Configuração 1: Painel CLT (adaptado de (Bettarello et al., 2021))

Para a configuração 2 (Figura 19), foi acrescentado um teto falso com uma caixa de ar preenchida com lã de rocha e por último uma placa de gesso cartonado de que tiveram como função a melhoria do isolamento a sons aéreos.

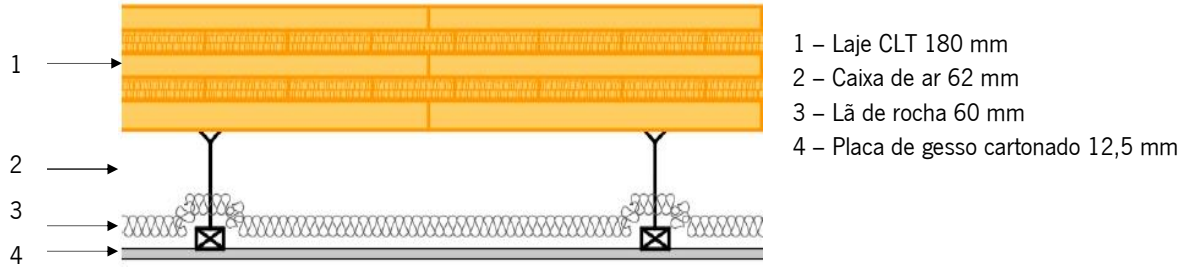
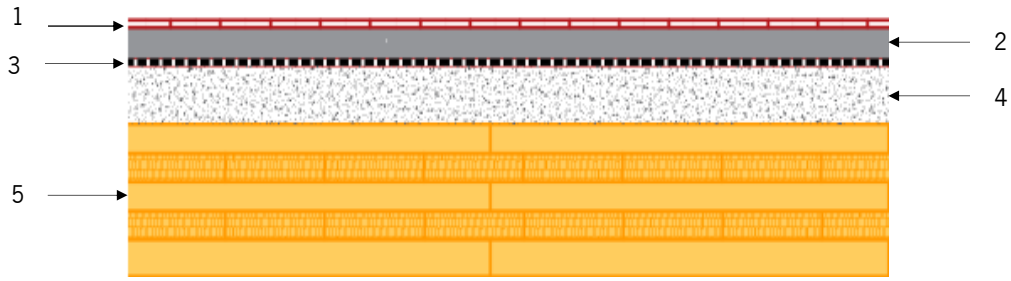



Figura 19 – Configuração 2: Painel CLT com teto falso Bettarello et al., 2021))

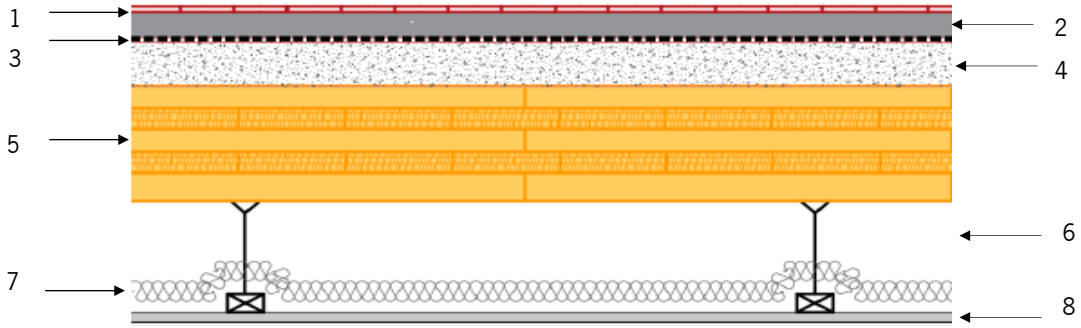
Na configuração 3 (Figura 20), foi implementado um revestimento de piso flutuante de forma a melhorar o isolamento a sons de percussão. Foi acrescentada uma membrana pára vapor, a camada de betonilha 2, a camada resiliente, a camada de betonilha 1 e por fim o revestimento de piso.




1 – Revestimento de piso
3 – Camada resiliente 9 mm
5 – Laje CLT 180 mm
2 – Betonilha 1 40 mm
4 – Betonilha 2 100 mm

Figura 20 – Configuração 3: Painel CLT com piso flutuante (Bettarello et al., 2021)

A configuração 4 (Figura 21) foi testada de forma determinar o efeito tanto do teto falso como do piso flutuante no desempenho da laje com painel CLT.




1 – Revestimento de piso
3 – Camada resiliente 9 mm
5 – Laje CLT 180 mm
7 – Lã de rocha 60 mm
2 – Betonilha 1 40 mm
4 – Betonilha 2 100 mm
6 – Caixa de ar 62 mm
8 – Placa de gesso cartonado 12,5 mm

Figura 21 – Configuração 4: Painel CLT com piso flutuante e teto falso Bettarello et al., 2021)

Foi medido o isolamento sonoro das diferentes configurações. Na Figura 22, apresentam-se os resultados obtidos para as diferentes configurações no que diz respeito ao índice de isolamento sonoro a sons de percussão normalizado para a utilização da máquina de passos.

Os resultados mostram um grande impacto no aumento do isolamento a sons de percussão com a utilização da caixa de ar na configuração 2 e do piso flutuante na configuração 3 e também na junção dos dois na configuração 4.

Para o isolamento a sons aéreos, o índice de redução sonora aparente obtido para as configurações 2 ($R'_w$ [C, $C_{tr}$] = 52 [-2; -6] dB), 3 ($R'_w$ [C, $C_{tr}$] = 51 [-1; -4] dB) e 4 ($R'_w$ [C, $C_{tr}$] = 53 [-1; -3] dB) foi significativamente melhor do que para a 1 ($R'_w$[C, $C_{tr}$]= 35 [0;-3] dB), não tendo sido reveladas diferenças substanciais entre elas (Bettarello et al., 2021).

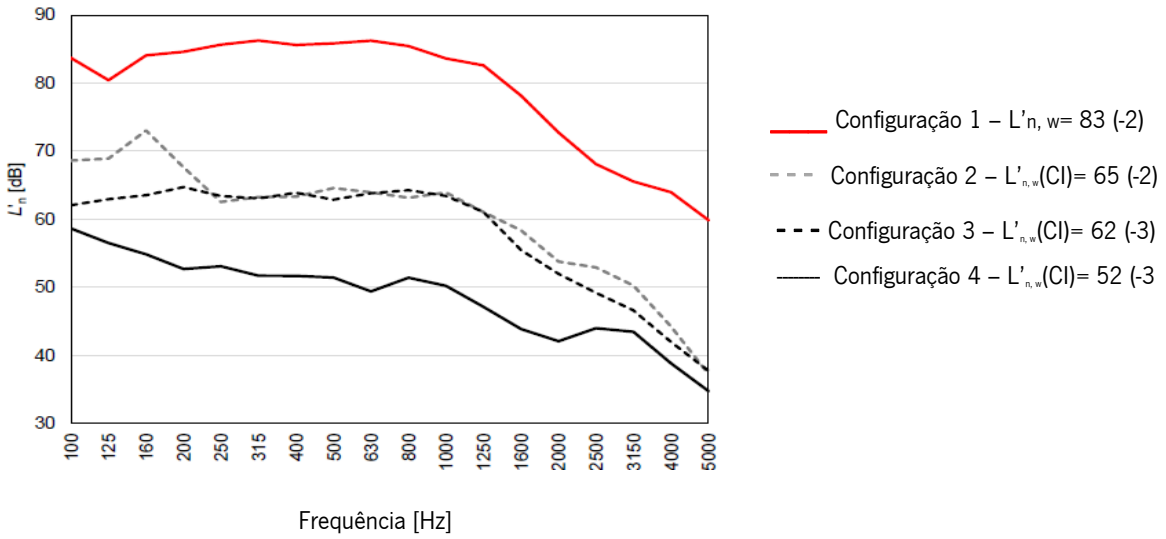



Figura 22 Nível de pressão sonora de percussão para lajes em CLT (configurações 1, 2, 3 e 4). Fonte : máquina de passos (adaptado de Bettarello et al.,2021)

Quanto ao uso de materiais de absorção acústica em painéis CLT, foram realizados estudos para perceber o seu impacto no isolamento tanto a sons de condução aérea como de percussão. Com o objetivo de determinar em que medida o tipo de piso flutuante, a dimensão da caixa de ar e material de absorção acústica seriam necessários para promover o conforto acústico desejado Vairetti et al. (2021) investigaram o cumprimento dos requisitos regulamentares holandeses para um hotel. Os módulos constituintes do edifício consistiam em 2 pilares de madeira do lado da parede de fachada e um piso de CLT com 7 camadas (240 mm de espessura total), conectados entre si por montantes de aço. As paredes não estruturais consistiam em CLT com 3 camadas (80 mm de espessura total), enquanto 1 painel de CLT de 3 camadas (60 mm de espessura total) foi utilizado para o teto. Foram utilizadas placas no topo das lajes CLT (piso flutuante), que providenciaram um aumento da massa da solução em 45 kg/m$^2$ (Vairetti et al., 2021). A Figura 23 representa a solução construtiva utilizada para os diferentes elementos construtivos.

Ao nível do arranjo vertical (pavimento-teto), destacou-se a melhoria do desempenho acústico com a adição de lã mineral na caixa de ar criada entre os painéis do pavimento e teto, sendo mais visível o efeito nas baixas frequências do que nas altas. A substituição da manta acústica de 9 mm por 20 mm de lã mineral como camada resiliente do piso flutuante também teve um impacto significativo, melhorando em 4 dB o isolamento sonoro a sons de percussão no pavimento flutuante. Ao analisarem o cumprimento dos requisitos acústicos Vairetti et al. (2021) referem que os requisitos relativos ao isolamento a sons de condução aérea não foram cumpridos, apresentando como solução o aumento da espessura do teto e aumento da caixa de ar ou o uso de um teto suspenso acústico.

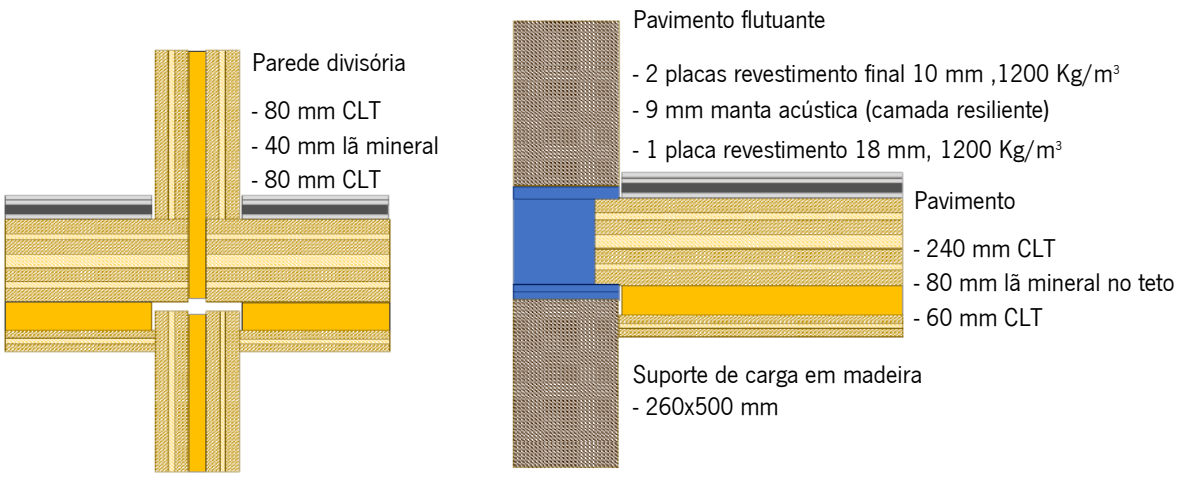



Figura 23 – Soluções de parede, laje e cobertura (adaptado de (Vairetti et al., 2021))

Para o arranjo vertical, Vairetti et al. (2021) concluíram que a solução apresentada tem bom desempenho acústico tanto a sons de condução aérea como de percussão, com uma massa total do elemento construtivo de 200 kg/m$^2$, com a combinação da lã mineral na caixa de ar e como camada resiliente do piso flutuante. Referem também que as transmissões marginais através dos montantes de aço não foram significativas (Vairetti et al., 2021). Para o arranjo horizontal Vairetti et al. (2021) referem que a baixa massa dos painéis CLT de 80 mm resulta num reduzido isolamento acústico abaixo dos 250 Hz. Pela análise dos gráficos os investigadores referem que o baixo desempenho para frequências abaixo de 100 Hz para a configuração com lã mineral na caixa de ar resulta provavelmente do alto nível de compressão das mantas deste material, sendo esta a solução com maior isolamento sonora a sons aéreos. O aumento da espessura da caixa de ar (de 40 mm para 60 mm, sem lã mineral) promoveu um aumento do isolamento a sons aéreos em 2 dB em grande parte do espectro de frequências estudado (50-5000 Hz). Para o isolamento a sons de percussão o aumento da caixa de ar (de 40 mm para 60 mm, sem lã mineral), apresentou uma ligeira diferença no seu comportamento (cerca de 1 dB), continuando a ser entre as 3 soluções a que contém 40 mm de lã mineral na caixa de ar a melhor.

Com o intuito de investigar o isolamento a sons aéreos e de percussão de lajes em CLT Vardaxis et al. (2022) definiram 12 configurações que foram testadas em laboratório de forma a descobrir qual a mais eficiente em relação à sua capacidade de isolamento acústico. Os investigadores referem algumas considerações: não foi usada cola, nem nenhum conector entre camadas, sendo estas apenas sobrepostas umas sobre as outras completando a área da sua superfície; e a placa de gesso cartonado utilizada tinha uma massa volúmica superior aos valores usuais (1135 kg/m$^3$). Entre as configurações destacam-se o uso de betão nas configurações 8-12. A solução de referência considerada foi uma laje em CLT com 180 mm de espessura. Os valores foram medidos com e sem revestimento superior em

*parquet*, sendo este um revestimento usual em edifícios residenciais ou de escritórios na Suécia. As dimensões do painel de laje eram de 4000 mm de comprimento e 3100 mm de largura. A gama de frequências estudada situa-se entre 50-5000 Hz na banda de 1/3 de oitava. A Tabela 10 apresenta os diferentes materiais utilizados no estudo.

Tabela 11 – Visão geral das propriedades dos materiais em estudo (adaptado de (Vardaxis et al.,2022))

| Material | Espessura (mm) | Densidade ($kg/m^3$) | Massa por Unidade de Área ($kg/m^2$) |
|---|---|---|---|
| Painel CLT | 180 | 523,9 | 94,3 |
| Placa de gesso cartonado (alta densidade) | 12,5 | 1134,6 | 14 |
| Contraplacado de madeira | 12,5 | 641,0 | 8 |
| Betonilha 1 | 30 | 1850,0 | 55,5 |
| Betonilha 2 | 60 | 1850,0 | 111 |
| Lã de vidro | 20 | 330,1 | 6,6 |
| Camada resiliente A | 12 | 359,8 | 4,3 |
| Camada Resiliente B | 12 | 340,2 | 4,1 |
| *Parquet* (madeira) | 13 | 573,7 | 7,5 |

As configurações das lajes analisadas (da camada superior para a inferior) e o respetivo $R_w$ e $L_{n,w}$ obtidos no estudo foram os seguintes (Vardaxis et al., 2022):

- Configuração 0 (referência) – CLT, [$R_w$ = 32 dB; $L_{n,w}$ = 86 dB];
- Configuração 1 – *Parquet* (madeira), uma placa de gesso cartonado, camada resiliente B e CLT, [$R_w$ = 43 dB; $L_{n,w}$ = 66 dB];
- Configuração 2 – *Parquet* (madeira), uma placa de contraplacado de madeira, uma placa de gesso cartonado (alta densidade), camada resiliente B e CLT, [$R_w$ = 45 dB; $L_{n,w}$ = 65 dB];
- Configuração 3 – *Parquet* (madeira), uma placa de gesso cartonado, camada resiliente A, camada resiliente B e CLT, [$R_w$ = 46 dB; $L_{n,w}$ = 64 dB];
- Configuração 4 – *Parquet* (madeira), duas placas de gesso cartonado, camada resiliente A, camada resiliente B e CLT, [$R_w$ = 47 dB; $L_{n,w}$ = 62 dB];
- Configuração 5 – *Parquet* (madeira), duas placas de contraplacado de madeira, duas placas de gesso cartonado , camada resiliente A, camada resiliente B e CLT, [$R_w$ = 50 dB; $L_{n,w}$ = 60 dB];
- Configuração 6 – *Parquet* (madeira), duas placas de gesso cartonado , duas camadas resilientes B e CLT, [$R_w$ = 51 dB; $L_{n,w}$ = 62 dB];
- Configuração 7 – *Parquet* (madeira), duas placas de gesso cartonado, camada resiliente B, lã de vidro e CLT, [$R_w$ = 50 dB; $L_{n,w}$ = 59 dB];
- Configuração 8 – *Parquet* (madeira), betonilha (30 mm), camada resiliente B, lã de vidro e CLT, [$R_w$ = 53 dB; $L_{n,w}$ = 57 dB];

- Configuração 9 – *Parquet* (madeira), betonilha (60 mm), camada resiliente B, lã de vidro e CLT, [$R_w$ = 54 dB; $L_{n,w}$ = 54 dB];
- Configuração 10[4] – *Parquet* (madeira), betonilha (60 mm), camada resiliente B, lã de vidro, CLT, caixa de ar e duas placas de gesso cartonado, [$R_w$ = 59 dB; $L_{n,w}$ = 52 dB];
- Configuração 11 – *Parquet* (madeira), betonilha (30 mm) e CLT, [$R_w$ = 43 dB; $L_{n,w}$ = 70 dB];
- Configuração 12 – *Parquet* (madeira), betonilha (60 mm) e CLT, [$R_w$ = 45 dB; $L_{n,w}$ = 66 dB].

Relativamente à prestação em relação ao isolamento a sons aéreos e em comparação com a solução de referência, configuração 0 (laje em CLT com 180 mm de espessura), a utilização da camada resiliente B e da placa de gesso cartonado (alta densidade) traduziu-se numa melhoria de desempenho mais significativa nas frequências mais elevadas, de 16,5 dB (1250 Hz), não sendo muito expressivo nas baixas frequências, com cerca de 1,4 dB (80 Hz). Nos casos onde é utilizada a camada resiliente B e lã de vidro (configurações 7-10) observam-se os níveis mais elevados do índice de redução sonora a sons aéreos, sendo de destacar a solução 10 que apresenta um teto falso com caixa de ar e duas placas de gesso cartonado. As soluções 11 e 12, que apresentam apenas betonilha sobre o pavimento CLT sem piso resiliente, tiveram resultados moderados (Vardaxis et al., 2022).

A solução de referência apresenta o pior resultado em relação à prestação a nível do isolamento sonoro a sons de percussão. A solução 1 com a inclusão da camada resiliente B e placa de gesso cartonado (alta densidade) apresentou melhor desempenho, sendo que nas frequências altas a melhoria foi de 41 dB (5000 Hz), mas com menor efeito em frequências mais baixas, de 2,8 dB (100 Hz). Neste caso, as configurações 3-6 com o uso de dois pisos resilientes (A e/ou B) mostraram melhores desempenhos, o que não aconteceu ao nível do isolamento a sons aéreos. As soluções 7-10 que contemplam o uso da camada resiliente B sobre a lã de vidro, continuam a apresentar o melhor comportamento, semelhante ao que acontecia no caso do isolamento a sons aéreos (Vardaxis et al., 2022).

Como era expectável por parte dos investigadores Vardaxis et al. (2022), as melhorias das diferentes configurações não se repercutiram tanto para sons aéreos (abaixo dos 125 Hz) como para sons de percussão (abaixo dos 100 Hz). De acordo com as principais conclusões deste estudo, o uso de camadas resilientes e de pavimentos flutuantes promoveram uma melhoria no isolamento sonoro tanto a sons aéreos como de percussão. Em termos económicos e de desempenho as soluções 6 e 7 destacam-se no que toca aos pavimentos sem inclusão de betonilha. Duas placas de gesso cartonado (alta densidade)

[4] A configuração 10 foi medida apenas uma vez com *parquet* (madeira)

sobrepostas a dois pisos resilientes apresentam um desempenho suficiente relativamente ao isolamento a sons aéreos e de percussão sem a necessidade de aumentar a espessura das camadas. Apesar da configuração 10, com o teto falso, ter os melhores resultados globais, existem alguns resultados adversos nas frequências entre 50-80 Hz e 1600-5000 Hz no isolamento a sons de percussão. A utilização do teto falso deve ser estudada pois pode permitir a melhoria do desempenho acústico, tendo as soluções com teto falso o melhor desempenho, tanto em relação ao isolamento a sons de condução aérea como de percussão.

Com o objetivo de estudar o desempenho ao nível do isolamento sonoro de sistemas pavimento/teto de madeira, Chung et al. (2014) estudaram o impacto no seu amortecimento com a utilização de um composto constituído por areia (80%) e derivados de madeira (20%). Foram referidos dois exemplos de sistemas pavimento/teto, sendo o desenvolvido constituído pelas seguintes camadas (superior para inferior): placa de contraplacado (15 mm), caixa de ar (90 mm), onde 85 mm são preenchidos com uma mistura de areia e derivados de madeira, entre os sarrafos de madeira com uma secção 90x45 $mm^2$, placa de contraplacado (15 mm), vigas em madeira laminada (secção 300x45 $mm^2$) com uma camada resiliente em borracha, duas camadas de isolamento acústico em lã de fibra de vidro (150 mm) contidas na caixa de ar, calhas metálicas (35 mm) e duas placas de gesso cartonado (13 mm cada).Os resultados mostram o bom comportamento no amortecimento acústico do composto de areia e derivados de madeira mostrando o potencial mesmo quando comparado a uma camada de betão.

Na investigação foi usada a máquina de passos para o estudo do isolamento a ruídos de impacto durante o programa experimental (Chung et al., 2006). Chung et al. (2014) referem que foi obtido o valor de $L_{n,w}$ = 52 dB tanto para o sistema com a camada de betão como para o que usa a camada de areia e derivados de madeira quando apresentam a mesma rigidez da camada superior e, se for tido em conta um sistema de areia e derivados de madeira em que seja aumentada a espessura desta camada (permitindo obter a mesma massa do sistema de betão), o valor ainda é mais relevante com $L_{n,w}$ = 47 dB (Chung et al., 2014).

No Anexo 2, são apresentadas algumas soluções construtivas de pavimentos com os respetivos valores de índice isolamento a sons de percussão e coeficiente de transmissão térmica com base na informação apresentada no ITE-50 (Dos Santos et al., 2006).

### 2.3.3 Influência das conexões na quebra do isolamento térmico e acústico

As conexões apresentam elevada influência no isolamento dos painéis pré-fabricados em madeira, tanto no que toca ao isolamento térmico como acústico. Relativamente ao desempenho térmico, as conexões entre os elementos construtivos (paredes, pavimentos, janelas, por exemplo) apresentam-se como essenciais tanto na diminuição das perdas de calor através da envolvente do edifício como também promovem a diminuição de patologias, tais como pontes térmicas causadoras de condensações (Pihelo et al., 2016). A presença de humidade nos edifícios, que atravessa os elementos da envolvente, prejudica os ocupantes, leva à mudança das propriedades dos materiais e à consequente deterioração do edifício. A nível acústico, a correta fixação entre os elementos também permite a melhoria do isolamento acústico ao nível da redução de vibrações (Di Bella et al., 2020).

No continente europeu, foram desenvolvidos procedimentos de projeto que incluem o uso de buchas, parafusos e pregos na produção de painéis CLT (Mohammad et al., 2012). Tal como acontece com os materiais de construção, cada fabricante apresenta diversas soluções de conexões, parafusos, pregos e fixações para os elementos construtivos, logo a sua utilização irá ter em conta o tipo de edifício em que se insere. A Figura 24 apresenta alguns materiais utilizados para a fixação de painéis pré-fabricados de madeira.

As infiltrações de ar no edifício são um problema que afeta o seu desempenho térmico. Kalamees (2007) estudou, em condições de laboratório e *in situ*, paredes exteriores em *timber-frame* de forma a entender o seu desempenho na estanqueidade ao ar e obter informações relativamente à infiltração de ar para diferentes soluções de vedação. No que diz respeito às infiltrações de ar nos edifícios, mostraram que a zona crítica se localizava na junção da parede exterior com o pavimento, bem como nos cantos externos das paredes, devido à descontinuidade da barreira de ar e vapor utilizada. O uso de fitas autoadesivas foi considerado a solução mais promissora para garantir os níveis de estanquidade ao ar necessários nas estruturas de madeira. O desempenho higrométrico é melhorado de forma apreciável usando revestimentos permeáveis ao vapor com alta resistência térmica, tendo também em conta o uso de fitas de vedação (Gullbrekken et al., 2020).



Figura 24 – Diferentes tipo de parafusos, juntas e uniões usados em painéis de madeira pré-fabricados (Caniato, et al., 2017)

Estudos realizados por Caniato et al. (2019) visaram aplicar um modelo para a determinação da influência dos materiais na propagação das ondas acústicas, em paredes, focando-se em especial na transmissão de sons aéreos, em contexto laboratorial. A estrutura da parede de madeira consistiu no uso das seguintes camadas, do interior para o exterior, painel OSB com 22 mm, vigas de madeira com 160 mm de espessura e 80 mm de largura, 160 mm de lã mineral com 40 kg/m$^3$ de massa volúmica e, por fim, painel OSB com 14 mm. Foi medida a diferença entre modelos, sendo de destacar a comparação entre o uso de OSB isotrópico (material com propriedades similares em diferentes direções) e anisotrópico (material com propriedades diferentes nas diversas direções), assim como a comparação entre o uso ou não de pregos para fixação.

De forma evidente, foi constatada a influência das conexões usadas na estrutura em relação ao isolamento sonoro. Caniato et al. (2019) verificaram que as paredes divisórias poderiam ter um desempenho acústico elevado se não fossem incluídas as conexões estruturais que as atravessam. As simulações realizadas mostraram que, quando são inseridas as conexões rígidas ao longo de toda a partição o desempenho é pior devido à propagação sólida.

No seu estudo, Quirt et al. (2006) referem alguns fatores que podem influenciar a forma como as transmissões marginais podem ser reduzidas em edifícios de madeira. Relativamente a sons aéreos, destaca-se a importância da massa do revestimento colocado e a sua instalação, apesar desta ser menos importante. Para sons de percussão, aplica-se o mesmo raciocínio, acrescentando-se a importância da rigidez do revestimento superficial. O revestimento de piso resiliente melhora o desempenho do pavimento a sons de percussão. A utilização de um pavimento em betão armado também necessita de um revestimento resiliente de forma a "mascarar" o ruído de impacto produzido.

Os revestimentos do pavimento tendem a melhorar significativamente o ruido de impacto aparente quando reduzem a sua dureza. Assim, Quirt et al. (2006) constataram que a utilização de uma carpete é mais eficaz do que um piso vinílico quando aplicado em superfícies duras, não acontecendo o mesmo quando este é aplicado em superfícies como OSB. Na utilização de placas de gesso cartonado, também

constataram que a implementação de uma camada resiliente tem melhor desempenho do que, por exemplo, anexar outra placa de gesso cartonado ao sistema construtivo.

O estudo da transmissão marginal a sons aéreos e de percussão foi estudado também por Schoenwald et al. (2013) ao longo da conexão laje-parede. O estudo foi efetuado para dois compartimentos separados por uma parede CLT, composta por três camadas, com 5 m de largura e 2,5 m de altura. A laje tem cinco camadas e apresenta 4 m de comprimento, sendo contínua ao longo da ligação. Foram apresentadas 3 soluções de conexão em cruz (mais crítica) entre a laje e a parede: a primeira implementa o uso de cantoneiras (90 mm) aparafusadas, tanto na zona superior como na inferior, a cada 300 mm; a segunda utiliza, na parte inferior da parede, parafusos auto-roscantes com 300 mm de comprimento e, na parte superior, cantoneiras de aço similares aos da primeira solução; na última solução, foram utilizadas retenções constituídas por varões de aço roscados que conectam a parte inferior e superior da parede, através de furos na laje, estando apenas conectadas à parede. Os resultados obtidos mostraram que a ligação laje-laje tem uma transmissão cerca de 10 dB mais baixa do que a ligação laje-parede para a geometria normalizada, resultado da forte transmissão ao longo da junção da laje (Schoenwald et al., 2013). Na ligação laje-parede, foram obtidos os valores mais baixos, sendo mais altos em médias e altas frequências para as ligações laje-laje.

Em Portugal, os edifícios correntes tanto de habitação como de serviços, têm uma malha estrutural e de compartimentação relativamente regular sendo privilegiadas as ligações em cruz (X) e T (podem ser dirigidas no sentido do compartimento recetor ou do compartimento emissor quando desfasadas) e também em L (Patrício, 2018). Constata-se, por fim, que as conexões representam um aspeto bastante importante tanto no isolamento térmico como acústico, estando atualmente a ser desenvolvidos métodos que tornem a ligação entre painéis mais eficiente de modo a melhorar o seu desempenho.

## 2.4 Exemplos de edifícios em madeira

Neste subcapítulo, são apresentados alguns exemplos de edifícios em madeira, destacando sobretudo edifícios formados estruturalmente com o uso de produtos EWP. Não existem, no entanto, muitas informações, sobretudo para edifícios de altura mais reduzida, na literatura atual, tornando-se um obstáculo para a compreensão das possibilidade e limitações na construção de edifícios em madeira (Svatoš-Ražnjević et al., 2022).

### 2.4.1 Stadthaus, Reino Unido

O Stadthaus (Figura 25), projetado por Waugh e Thistleton Arquitetos e construído em 2008, é um edifício de madeira localizado em Londres, sendo o primeiro em altura construído inteiramente em painéis CLT, incluindo paredes estruturais, lajes, escadas e núcleo de elevadores, excluindo apenas as fundações e o rés-do-chão (Mclaren, 2019).



Figura 25 – Edifício Stadthaus em Londres (Lehmann, 2012)

A construção do edifício demorou 49 semanas, sendo que os oito andares em CLT demoraram apenas 12 semanas a ser construídos. A construção do edifício ficou completa em janeiro de 2009 (Lehmann, 2012; Wells, 2011).

O edifício é constituído por paredes maciças em CLT fornecidas por uma empresa do Reino Unido, sendo a madeira residual da produção dos painéis convertida em combustível, que abastece a fábrica e a aldeia local (Waugh et al., 2010). O edifício apresenta 9 andares, sendo as fundações e o rés-do-chão construídos em betão. Os apartamentos são de tipologias variadas podendo ter 1, 2 ou 3 quartos. Um típico painel CLT é feito de abeto e é formado por placas, coladas com adesivo não tóxico, empilhadas em camadas perpendiculares e coladas sob uma pressão de 60 ton/m$^2$ (Wells, 2011). As dimensões dos painéis foram idealizadas de modo a serem transportadas (cerca de 2,95 x 16,5 m) e com pelo menos 320 mm de espessura.

A disposição dos painéis é efetuada de modo a permitir que sejam suportados uns pelos outros (como um castelo de cartas). O núcleo do elevador e a caixa de escadas são estruturas independentes dentro do edifício e estão isoladas das paredes centrais circundantes e do perímetro, o que proporciona a

estabilidade lateral da estrutura (Waugh et al., 2010). Nos andares superiores, o suporte é fornecido pela lateral do painel horizontal do piso.

A configuração do Stadthaus é feita em plataforma, com cada andar colocado nas paredes abaixo deste e as juntas fixadas através de parafusos e montantes. As tensões são baixas, no entanto, são adicionados parafusos localmente de modo a reforçar as zonas de pressão perpendicular às fibras. O edifício apresenta redundância suficiente para permitir que qualquer elemento seja removido sem provocar colapso progressivo da sua estrutura (Ward, 2009).

Ao nível da resistência ao fogo, o arquiteto  Andrew Waugh em Ward (2009), refere que foi relativamente simples obedecer aos requisitos contando com as propriedades de autoproteção da madeira que, de acordo com Ward (2009) pode reter o fogo durante períodos mais longos do que no caso do aço ou até mesmo do betão. As fibras estreitas especificadas nas faces dos painéis melhoram de forma significativa a resistência ao fogo.

O controlo do movimento entre painéis é um dos aspetos chave para o desenvolvimento de estruturas de grandes dimensões em madeira. Os produtos de engenharia derivados da madeira apresentam-se com uma estabilidade dimensional comparáveis ao betão e ao aço, tendo um movimento de fluência negligenciável ao longo das faces dos painéis e inferior a 1% ao longo das fibras (Wells, 2011).

No que toca ao desempenho acústico, foram definidas algumas especificações para melhorar o desempenho do edifício. As paredes divisórias apresentavam placas de gesso cartonado com 9 mm de espessura de cada lado e caixa de ar com 10 mm, com material absorvente caso fosse necessário (Silva et al., 2012). No caso das lajes, foi instalado um teto falso. Na caixa de escadas e de elevadores, foi realizada a construção de uma parede dupla em CLT e gesso cartonado com 40 mm de caixa de ar (Waugh et al., 2010).

O custo da construção foi analisado e, em comparação a uma estrutura similar em betão armado apresentou um custo 10-20% superior. No entanto, na fase de execução da obra, existiram diversas compensações que diminuíram significativamente a diferença entre custos, sendo de destacar o facto de os painéis serem colocados imediatamente em obra promovendo uma arrumação e organização superior que permite economizar também na rapidez da execução com reduções de tempo na ordem dos 30% e também a maior facilidade de correção de erros no local (Waugh et al., 2010).

### 2.4.2 Virtuoso, Canadá

O Edifício Virtuoso (Figura 26) é um edifício híbrido multifamiliar de madeira localizado em Vancouver próximo da Universidade de *British Columbia* no Canadá (naturally: wood, sem data). O edifício apresenta 6 andares em madeira, com 87 apartamentos, com 2 andares subterrâneos em betão para estacionamento. O Engenheiro Estrutural responsável revelou que o edifício é híbrido, não pelo uso de betão nos estacionamentos, mas pelo uso de diversos derivados da madeira (Sorensen, 2019).



Figura 26 – Edifício Virtuoso, Canadá (Adera, sem data)

No exterior do edifício, existem elementos de madeira expostos, como é o caso das vigas em Glulam em cada piso e CLT nas varandas. Nos cinco primeiros andares o revestimento é realizado com tijolos (naturally: wood, sem data). Os painéis CLT de três camadas abrangem paredes exteriores e divisórias, sendo em algumas paredes incluída uma viga superior em Glulam que se projeta além da envolvente do edifício para suporte das varandas.

A velocidade de montagem das lajes de piso em CLT foi uma das vantagens referidas, tendo sido colocados 160 painéis por andar, a 12 minutos por painel, com a colocação de aproximadamente 420 $m^2$ em menos de três horas (Sorensen, 2019).

Para assegurar o conforto térmico e acústico, o edifício apresenta janelas com elevada prestação, com o revestimento do pavimento em madeira e material cerâmico aplicado sobre uma manta acústica semirrígida e um sistema de ar condicionado utilizado para aquecimento e arrefecimento usando ar temperado que provém de uma instalação localizada no primeiro andar do parque de estacionamento (naturally: wood, sem data).

### 2.4.3 MjØstårnet, Noruega

O MjØstårnet (Figura 27) é um edifício de 18 andares localizado em Brumunddal na Noruega, que ficou completo em março de 2019, tendo sido iniciada a construção da estrutura em madeira em setembro de 2017 (Liven et al., 2023). Apresenta diferentes instalações, sendo de destacar escritórios, 72 quartos de hotel, 33 apartamentos com varanda, restaurante no piso térreo, salas para conferências e terraço no telhado. Inicialmente, a altura estabelecida era de 81 m, no entanto a utilização de uma pérgula na cobertura do edifício elevou a altura total para 85,4 m acima do nível do solo (Liven et al., 2023).



Figura 27 – MjØstårnet. Vista do lago MjØsa (Liven et al.,2023)

A nível estrutural, o suporte das cargas é assegurado por treliças em Glulam de grande porte ao longo da fachada, bem como os pilares e as vigas internas. As paredes em CLT são usadas para suporte de cargas secundárias em três caixas de elevadores e duas caixas de escadas, não contribuindo para a estabilidade horizontal do edifício (Abrahamsen, 2017). É considerado um edifício em madeira, pois os principais elementos estruturais verticais/laterais e os sistemas de vãos são em madeira, mesmo considerando o uso de materiais como conexões metálicas para ligação entre painéis e o uso de lajes de betão nos últimos sete andares para responder às exigências de conforto térmico e acústico (whywood, sem data). O edifício assenta numa laje de betão suportada por estacas cravadas na rocha (Abrahamsen, 2017).

Liven et al. (2023) referem que, em termos de percentagem do volume de materiais utilizados na construção destacam-se principalmente a madeira (Glulam, CLT e madeira maciça) com 34%, o isolamento utilizado (não foi especificado) com 33% e o betão com 26%.

Destacam-se também medidas de proteção contra o fogo. Todo o edifício está equipado com *Sprinklers*, na fachada utilizaram-se sistemas corta-fogo para evitar a sua expansão e são usados montantes e cavilhas de aço que se encontram embutidas na madeira (+85 mm) (Abrahamsen, 2017).

### 2.4.4 Stories, Holanda

O Stories (Figura 28) é um edifício híbrido de apartamentos localizado em Amesterdão, concluído em 2021 (Svatoš-Ražnjević et al., 2022). Tem 13 andares, três em betão na base, para estacionamento automóvel, e os restantes 10 andares são em CLT (com placas que variam entre 160 e 240 mm), totalizando 46 m de altura (Archello, sem data).



Figura 28 – Edifício Stories, Países Baixos (Archello, sem data)

Nas fachadas além da madeira, destacam-se os 300 mm de isolamento térmico e a utilização de janelas também em madeira com altura igual ao pé direito de cada piso. Nos revestimentos, são usadas ripas de abeto tratadas termicamente e também com retardante ao fogo de forma a proteger as fachadas do clima local (Bokerne, 2023). As varandas do edifício são colocadas duas a duas e separadas das vizinhas por plantas com 6 m de altura (Archello, sem data).

Nas paredes divisórias, foram utilizadas soluções com gesso cartonado que contrastam com os tetos em madeira. No pavimento, para além da madeira no teto, que fica à vista, destaca-se superiormente a presença de revestimento com betão leve com 100 mm de espessura, sendo acima dessa camada usada uma camada de 40 mm para o isolamento a sons de percussão (Bokerne, 2023).

No Anexo 3, apresenta-se uma tabela resumo onde constam a localização, custos e as principais características dos sete edifícios em CLT analisados. No Anexo 4, apresenta-se uma tabela que apresenta a mesma caracterização do Anexo 3 para o primeiro edifício em altura em CLT construído na Austrália.

# 3. Análise de materiais de isolamento térmico/acústico

Nesta secção, serão apresentados diversos materiais utilizados para o isolamento térmico e acústico dos edifícios. Os materiais analisados estão divididos em quatro categorias: orgânicos, naturais, avançados e mantas acústicas. Na Figura 29, apresentam-se os materiais que irão ser estudados neste capítulo da dissertação.

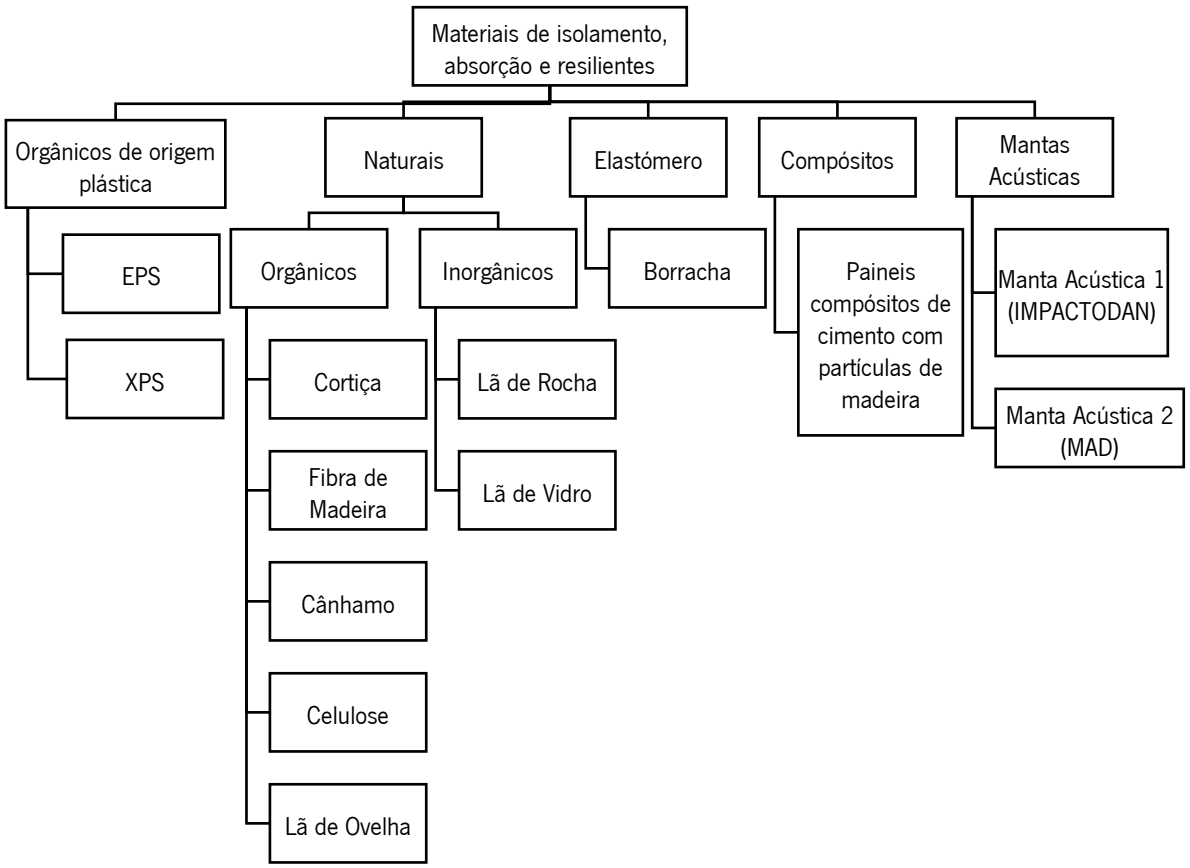



Figura 29 – Materiais estudados na dissertação

## 3.1 EPS

O poliestireno expandido, em Portugal mais conhecido por esferovite, é um material de origem plástica. Geralmente é obtido pela evaporação de pentano (hidrocarboneto composto por cinco carbonos e 12 hidrogénios) adicionado aos grãos de poliestireno. O processo permite obter uma espuma com células brancas, rígidas e fechadas (Schiavoni et al., 2016). Na sua produção, o processo de expansão ocorre dando origem ao seu nome "expandido" (Duarte et al., 2022). A sua utilização é efetuada em paredes exteriores, nomeadamente nos Sistemas Compósitos de Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS),

pavimentos e também coberturas. A boa resistência ao clima e a variações bruscas de temperatura tornam este material o mais usado, em todo o tipo de edifícios, como material de isolamento em paredes exteriores (Zhao, 2017).

Em Portugal, o EPS (Figura 30) é o material mais utilizado em sistemas ETICS, proporcionando o tratamento das pontes térmicas (reduzindo o risco de condensações superficiais) e uniformizando o coeficiente de transmissão térmica em toda a fachada (Silvestre et al., 2022).



Figura 30 – Placas EPS com diferentes espessuras (Gomes et al., 2020)

O EPS apresenta uma condutibilidade térmica, que varia entre os 0,035-0,040 W/(m.K), valores baixos que proporcionam a este material boa capacidade de isolamento térmico (Pásztory, 2021).

A sua baixa densidade (15-35 kg/m$^3$) e o facto da sua porosidade ser fechada tornam este material inadequado em termos de desempenho acústico (Schiavoni et al., 2016).

Khoukhi et al. (2021), estudaram o posicionamento de placas de EPS numa alvenaria de tijolo, nos Emirados Árabes Unidos, onde as condições climatéricas extremas, tornam imprescindível a colocação de isolamento térmico na envolvente. Foram definidas três situações de aplicação para o isolamento: pelo interior; pelo exterior; e na caixa de ar da parede. A melhor prestação foi o da solução com a colocação do isolamento na caixa de ar da parede, que apresentou a maior diferença de temperatura do exterior para interior durante o dia, e uma resistência térmica mais elevada, e a solução com isolamento térmico pelo interior que apresentou variações pouco significativas em relação a esta (Khoukhi et al., 2021).

Estudos realizados por Miskinis et al. (2018) compararam a prestação térmica e acústica de um sistema ETICS numa parede em alvenaria de tijolo com a incorporação de lã mineral ou EPS. Foi constatado que a lã mineral tem melhor comportamento acústico, pois a sua massa volúmica é superior à do poliestireno expandido (80 kg/m$^3$ para 180 mm de espessura, e 150 kg/m$^3$ para 200 mm de espessura) e também devido ao facto do EPS se apresentar como uma espuma fechada, sem poros que permitam a absorção sonora.

Em relação à resistência ao fogo[5], o EPS insere-se na classe E (alta contribuição para incêndio) (Kumar et al., 2020). É um material inflamável, que pode derreter quando é aquecido a altas temperaturas.

Wang et al. (2015), através de estudos, mostraram que independentemente da alteração da densidade e da espessura das placas, de EPS a probabilidade de ignição e a razão de perda de massa não se altera. Torna-se, por isso, necessário o uso de retardantes de incêndio neste material de forma a melhorar a segurança ao fogo, fator este que poderá provocar o aumento dos custos.

Os impactes ambientais do EPS também devem ser caracterizados. Gomes et al. (2020) estudaram o impacte ambiental da sua produção. Constataram que a produção dos grânulos deste material tinha impacto significativo em três categorias, sendo estas o consumo de energia primária renovável (PE-Re), potencial degradação da camada de ozono (ODP) e o potencial fotoquímico de produção de ozono (POCP), variando entre 56% para o PE-Re e 88% para o POCP (Gomes et al., 2020). Os resultados obtidos nestes três parâmetros deveram-se à queima do combustível na caldeira, consumo de energia e à libertação do gás pentano durante o processo. Os resíduos deste material podem ser incinerados permitindo recuperação de energia elétrica para aquecimento, com uma recuperação entre 25% e 35% da energia usada na sua produção (Cozzarini et al., 2020). É também possível a reciclagem deste material, com a recuperação de alguma matéria-prima que pode ser usada na produção de novos produtos com poliestireno (Cozzarini et al., 2020).

O EPS é um material corrente e comercializado em superfícies comerciais para as suas aplicações (*Leroy Merlin*, sem data). Relativamente a custos, é uma das soluções mais económicas (De Sousa, 2010).

## 3.2 XPS

O poliestireno extrudido, também é um material orgânico e de origem plástica. A sua produção faz-se a partir da fusão dos grãos de poliéster feitos numa extrusora (máquina que comprime um molde até obter a forma pretendida) com a adição de um agente de expansão (Biswas et al., 2016; Schiavoni et al., 2016). O produto obtido pode estar na forma de placas lisas ou com ranhuras. A aplicação pode ser

[5] A resistência ao fogo é definida através da EN 13501-1 e engloba os materiais que vão da classe A1 (materiais não combustíveis) até à classe F (facilmente inflamável).

efetuada em coberturas, caixa de ar de paredes, sistema ETICS, fachada ventilada e pavimentos (Fibrosom, sem data).

A condutibilidade térmica do XPS (Figura 31) pode variar entre 0,032-0,037 W/(m.K) (Kumar et al., 2020), comparando com o EPS, em termos gerais, apresenta valores mais baixos, o que confere melhor capacidade de isolamento térmico. A aplicação prática, como indica Zhao (2017), mostrou que uma placa de XPS com 30 mm tem a mesma capacidade de preservar o calor do que uma placa de 50 mm de EPS. Logo, os ganhos em termos de espessura do poliestireno extrudido podem rondar na ordem dos 30%. No entanto, os custos podem ser cerca de duas vezes superiores, sendo esta uma desvantagem do material (Zhao, 2017).



Figura 31 – Placas XPS (Danosa, sem data)

No que toca à sua massa volúmica, os valores variam entre 32 e 40 kg/m$^3$ (Schiavoni et al., 2016). Os valores são um pouco maiores do que os do EPS. Pedroso et al. (2019) compararam o comportamento de diversos materiais no que toca ao desempenho acústico. Considerando 3 tipos de paredes simples (parede de betão, parede de alvenaria com revestimento de argamassa e parede com sistema ETICS) e também três tipos de paredes duplas (parede dupla em alvenaria com caixa de ar e elemento absorvente, parede de alvenaria com gesso cartonado de 1 dos lados e parede dupla de gesso cartonado). A solução de parede simples em alvenaria de tijolo (220 mm) com reboco (20 mm de cada lado) e isolamento de XPS (50 mm) apresentou valores semelhantes do índice de redução sonora quando se mudava o isolamento para lã de rocha, EPS ou lã de vidro. Para as paredes duplas, as soluções com XPS apresentavam pior desempenho acústico, com valores mais baixos de isolamento acústico (51 dB), enquanto outros materiais como, por exemplo, lã de rocha (54 dB) ou cânhamo (56 dB) apresentavam desempenhos melhores.

No que diz respeito à resistência ao fogo, o XPS é também um material de classe E (Grazieschi et al., 2021). O XPS é combustível e inflamável, sendo necessário o uso de retardantes de incêndio neste material. Análises do perfil de temperatura do XPS quando sujeito ao fogo mostrou que este inicialmente torna-se macio e encolhe até chegar à fase líquida. Os gases combustíveis libertados fazem com que a

queima deste material continue a processar-se. Comparando a altura da chama entre a espuma de poliuretano e XPS, foi constatado que a altura da chama no XPS é maior, logo o material apresenta pior comportamento ao fogo (Jiang et al., 2014). Investigações efetuados por Cai et al. (2019) visaram também o comportamento ao fogo deste material, tendo verificado que, quanto maior a relação entre o comprimento e a largura da parede, a espessura da chama presente aumenta e depois diminui. Para a altura da chama, acontece o mesmo tendo em conta a "competição" relativamente ao abastecimento de oxigénio e o efeito chaminé.

Apesar das vantagens dos materiais orgânicos de origem plástica como o XPS, EPS entre outros, no que toca à condutibilidade térmica, densidade, resistência à água e o preço em comparação com os materiais inorgânicos, tem as suas desvantagens como a já referida resistência ao fogo, sendo também a energia incorporada e o carbono incorporado as características que fazem deste um mau material em termos de impactes ambientais (Zhao et al., 2022).

O XPS é formado por hidrofluorcarbonetos (HFCs) que possuem elevado valor de potencial de aquecimento global (GWP). Os HFCs funcionam como retardante de incêndio, libertando gases perigosos, como é o caso do $CO_2$, quando arde. A emissão destes compostos ocorre durante a produção, instalação, fase de uso, e no final de vida do material associa-se ao aumento do GWP (Biswas et al., 2016). Por outro lado, o uso de corantes neste produto como forma de distinção de outros, torna-o ainda mais prejudicial para o ambiente (Greenfield, 2024).

Quanto à sua comercialização, o XPS também é um material de fácil aquisição em empresas de venda de materiais de construção (*Leroy Merlin*, sem data).

## 3.3 Lã de rocha

A lã de rocha é um produto que, ao contrário dos previamente referidos, é inorgânico (produtos que são provenientes de minerais). A sua produção é feita a partir de vários géneros de rochas vulcânicas como, por exemplo, o basalto, que são fundidas a temperaturas na ordem dos 1600°C, onde as fibras obtidas são agrupadas por um agente de coesão como é o caso de resinas, amido ou óleos (Schiavoni et al., 2016). A sua aplicação pode ser efetuada em coberturas, pavimentos, paredes e tetos (Duarte et al., 2022).

A condutibilidade térmica da lã de rocha (Figura 32) varia entre 0,033-0,040 W/(m.K) (Schiavoni et al., 2016). No que diz respeito à massa volúmica os valores comuns para a lã de rocha variam entre os 40-200 kg/m$^3$ Kumar et al. (2020), tendo valores mais altos do que o XPS e EPS.

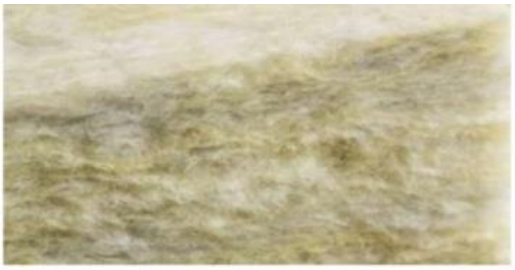


Figura 32 – Manta de lã de rocha (Termolan, 2019)

Estudos conduzidos por Karamanos et al. (2008) revelam que, para diferentes temperaturas, este material possui bons indicadores. Pode ser usado em diferentes aplicações, devido ao facto de ser possível adaptar a sua forma e a resistência aos agentes biológicos, químicos e aos impactos mecânicos, como vibrações. São referidos dois fatores que podem aumentar a condutibilidade térmica deste material, sendo eles as temperaturas elevadas e também a absorção de água.

Hongisto et al. (2022) analisaram diversos materiais disponíveis no mercado em relação a diversos parâmetros. Na 1ª fase, avaliaram: índice de redução sonora do material em si; índice de redução sonora do material encapsulado (inserido num elemento duplo constituído por uma placa de folheado de bétula de 9 mm (6,0 kg/m$^2$) e uma placa de 13 mm (9,9 kg/m$^2$) de gesso cartonado; coeficiente de absorção sonora; resistividade do ar; rigidez dinâmica por unidade de área; e por último a redução do nível de pressão sonora num piso flutuante (constituído por placas de folheado de bétula de 19 mm ao seu redor (16,4 kg/m$^2$). Na 2ª fase, analisaram a relação entre estes parâmetros com a densidade dos materiais e a sua condutibilidade térmica. O desempenho foi determinado para três espessuras de isolamento (50 mm, 100 mm e 200 mm). No caso da lã de rocha, foram estudadas quatro soluções de placas, que variavam em função da densidade, desde muito baixa, 25 kg/m$^3$, até alta, 100 kg/m$^3$. Os resultados obtidos mostraram que materiais com baixa condutibilidade térmica conduziam a piores desempenhos acústicos, tanto na redução sonora a sons de impacto (piso flutuante) como no índice de redução sonora a sons aéreos (material inserido em elemento duplo).

Para a lã de rocha, valores de massa volúmica mais altos não conduziram a melhores prestações tanto na absorção sonora como no índice de redução sonora. No entanto, no que toca a espessuras, a maior espessura contribui para uma melhoria do desempenho acústico. Foi também concluído que, de forma geral, materiais com poros abertos apresentaram resultados mais satisfatórios do que nos casos em que

estes se apresentavam fechados (Hongisto et al., 2022). Por último, Hongisto et al. (2022) deixam uma nota para os produtores, referindo a importância de os catálogos apresentarem as propriedades acústicas dos materiais de isolamento.

A lã de rocha também se incluía nos materiais estudados por Pedroso et al. (2019) sendo que, para paredes duplas, as soluções com lã de rocha apresentaram melhor comportamento em comparação com as soluções com XPS e EPS, no entanto, ficou aquém do desempenho do cânhamo, por exemplo. A lã de rocha apresenta bom desempenho acústico com a sua instalação em caixas de ar (Schiavoni et al., 2016).

A resistência ao fogo da lã de rocha constitui uma das suas grandes vantagens. A classe associada a este material é A1-A2 (Kumar et al., 2020), significando que este material é não combustível. O estudo do comportamento ao fogo de uma placa constituída por lã de rocha com 170 kg/m$^3$ foi realizado por Sjostrom et al. (2012). A placa foi colocada no forno e foram retiradas as temperaturas a que a placa se situava em comparação com o forno. Foi constatado que ocorreram por duas vezes processos exotérmicos (libertação de energia) em que a temperatura da placa suplantou em vários graus a temperatura do forno. A primeira ocorreu devido à existência de matéria orgânica na placa que conecta as partículas e os óleos usados na produção. O segundo processo ocorreu aquando da cristalização das fibras amorfas da lã. Também é referida que a modulação do comportamento ao fogo deste material é possível com o uso de ferramentas simples, sendo essa uma vantagem.

No que diz respeito aos impactes ambientais, este material apresenta aspetos positivos e negativos. Segundo as análises efetuadas por Füchsl et al. (2022), em termos de materiais convencionais, a lã de rocha encontra-se bem classificada no que respeita ao desempenho ambiental. Fica atrás de materiais naturais como a celulose e o cânhamo e também do EPS por uma pequena margem. O potencial de acidificação (AP) é um dos indicadores onde a lã de rocha apresenta pior comportamento.

Num estudo realizado por Schmidt et al. (2004) também é estabelecida uma comparação entre a lã de rocha (lã com alto teor de alumina e baixo teor de sílica) com materiais de origem natural, neste caso, lã de papel e linho. Em relação ao GWP este deve-se sobretudo ao processo de produção, onde combustíveis fósseis são usados para fundir o material e fornecer energia. A produção de matéria-prima também não acarreta elevados consumos de energia. A lã de rocha tem o menor consumo de energia entre estes materiais ao longo do seu ciclo de vida. Em relação ao potencial risco para a saúde, é referida a qualidade deste material por ser testado de forma corrente. Estes materiais podem ser reciclados pelos fabricantes ou ser descartado em aterros (Schiavoni et al., 2016).

A lã de rocha é um produto de fácil obtenção em Portugal em termos de comercialização quer em placas ou rolo (*Leroy Merlin*, sem data). Quanto a custos, é também um dos produtos mais vantajosos (Duarte et al., 2022).

## 3.4 Lã de vidro

A lã de vidro é um material inorgânico de origem natural e mineral. A sua produção é feita a partir do aquecimento de areia e vidro a temperaturas situadas entre os 1300-1450°C, logo, a temperaturas mais baixas do que a lã de rocha (Schiavoni et al., 2016). A areia constituinte é de quartzo, dolomite e calcário. O vidro utilizado é usualmente reciclado. Normalmente não são necessárias resinas neste material, mas se forem produzidas mantas, devem ser utilizadas para unir os materiais (Hill et al., 2018). Os usos das resinas têm também o objetivo de aumentar a resistência mecânica, sendo o seu uso limitado de forma a não afetar a alta resistência ao fogo deste material (Papadopoulos, 2005).

A lã de vidro (Figura 33) apresenta aplicações similares às da lã de rocha, devendo ser aplicada por técnicos conhecedores das suas características e que percebam a melhor forma de a aplicar no elemento construtivo (Duarte et al., 2022).



Figura 33 – Lã de vidro em rolo (adaptado de (De Sousa, 2010))

No que toca ao desempenho térmico, a condutibilidade térmica da lã de vidro varia entre 0,030-0,050 W/(m.K) (Kumar et al., 2020), valores próximos aos da lã de rocha, podendo ser um pouco mais baixos. A massa volúmica da lã de vidro apresenta valores que variam entre 13-100 kg/m$^3$ (Papadopoulos, 2005), valores semelhantes aos da lã de rocha.

Kyoung-Woo et al. (2014) testaram amostras de lã de vidro de um edifício de escritórios localizado na Coreia do Sul. Foram comparadas uma amostra que estava presente num edifício que data de 1997 (amostra antiga), pré-reabilitação, e a amostra de lã de vidro que iria ser usada aquando da reabilitação do edifício em 2012 (amostra nova). A amostra mais antiga, tendo sido sujeita durante 16 anos a

temperaturas abaixo de -10°C e acima de 30°C e também à variação da humidade relativa entre verão (entre 50-80%) e inverno (10-30%) era expectável que apresentasse as suas propriedades físicas deterioradas devido às grandes variações das condições climáticas exteriores. As diferenças notadas entre amostras no que respeita à condutibilidade térmica foram anotadas. Para uma temperatura de cerca de -10°C a espécie antiga apresentou um aumento da condutibilidade térmica de 1.6%, tendo obtido valores superiores em relação à amostra nova em 2,5% e 4,0% para temperaturas de 30°C e 40°C respetivamente (Kyoung-Woo et al., 2014). Na faixa de temperaturas de 0-20°C o comportamento foi similar (Kyoung-Woo et al., 2014). Isto mostra que não houve deterioração do material, sendo por isso um isolamento térmico durável. As diferenças mais significativas entre as amostras foram notadas, ao microscópio, na espessura e forma das fibras (Kyoung-Woo et al., 2014).

Wang et al. (2022) estudaram a variação da condutibilidade térmica de diversos materiais em função da variação de temperatura e humidade relativa. A evolução da condutibilidade térmica da lã de vidro em relação ao aumento de temperatura foi linear, tal como, por exemplo, a da lã de rocha. A grande diferença manifestou-se na elevada humidade relativa. Para 100% de humidade relativa, ocorreu um pico da condutibilidade que não se manifestou na lã de rocha.

O estudo do desempenho acústico, já anteriormente referido, realizado por Kyoung-Woo et al. (2014), avaliou a diferença do coeficiente de absorção sonora entre a amostra de material antigo e novo, apresentando um valor de 0,52 e 0,62 respetivamente. As diferenças manifestadas estão associadas à gama de frequências 500-2500 Hz. A alteração da espessura das fibras na amostra de material antigo, resultantes do envelhecimento, é uma das possíveis causas destas diferenças.

Pedroso et al. (2019) estudaram também o comportamento acústico, relativo ao índice de redução sonora da lã de vidro (56 dB), em paredes duplas, sendo este um índice superior à maioria dos materiais, no entanto, ficando aquém do valor obtido para o cânhamo.

A classe de resistência ao fogo é a A1-A2, constituindo uma das vantagens deste material (Schiavoni et al., 2016).

Com o objetivo de desenvolver e sintetizar fibras híbridas com revestimento em fibras de lã de vidro e lã de rocha, Amir et al. (2015) testaram diferentes soluções, tendo por base diferentes comprimentos das fibras, e mediram a sua segurança contra o fogo. Foi verificado que o reforço das fibras é uma boa solução para melhorar tanto o desempenho térmico como a proteção ao fogo. Os materiais inorgânicos usados (lã de rocha e lã de vidro) promovem a expansão da carbonização. O reforço com lã de vidro

como elemento único apresentou maior expansão por se tratar de um elemento de baixa densidade e com fibras curtas. No caso de fibras híbridas para a lã de rocha, foi obtido melhor comportamento comparando com a lã de vidro, sendo melhor retardante de incêndio. A promoção de maior resistência ao fogo do aço também foi testada e aí foi a lã de rocha com fibras longas reforçadas que conferiam maior proteção (Amir et al., 2015).

Füchsl et al. (2022) estudaram o desempenho ambiental da lã de vidro tendo em conta diversos indicadores. Um dos aspetos positivos foi o AP que é o mais baixo comparando com a lã de rocha, cortiça, EPS, entre outros materiais. Nos restantes indicadores o comportamento assemelha-se aos materiais convencionais.

Fazendo uma análise tendo em conta os diversos materiais analisados e o impacte ao longo do seu ciclo de vida, a lã de vidro apresenta valores intermédios, tendo menos impactes ambientais do que as fibras de madeira, cortiça, lã de ovelha, XPS, EPS (curta margem), entre outros. Exemplos de materiais com menores impactes ambientais que a lã de vidro foram a celulose, cânhamo, lã de rocha, sendo uma curta margem entre as lãs minerais (Füchsl et al., 2022).

A energia incorporada de diferentes materiais foi estudada por Hill et al. (2018), sendo também possível constatar que a lã de vidro apresenta valores baixos de energia incorporada comparando aos materiais orgânicos como o XPS e EPS e valores mais altos do que a celulose. Apesar disso, os valores de energia incorporada da lã de vidro encontram-se mais próximos dos obtidos para a celulose, sendo por isso um bom material neste indicador.

A comercialização de lã de vidro é realizada em Portugal (*Bricomarché*, sem data).

## 3.5 Cortiça

A cortiça é um produto de origem natural, obtido a partir do sobreiro (*Quercus Suber*), sendo amplamente difundido por toda a bacia mediterrânea e com grande relevância em Portugal, com particular incidência nas zonas Centro e Sul do país (Duarte et al., 2022). A sua constituição química engloba vários compostos, dividindo-se em cinco grupos: suberina (45% - responsável pela sua compressibilidade e elasticidade); lenhina (27% - estrutura das paredes celulares); polissacarídeos (12% - também ligados à estrutura da cortiça); ceroides (6% - repelem a água, contribuindo para a impermeabilidade); taninos (6% - cor e proteção/conservação do material); e cinzas (4%) (Gil, 1998). A aplicação da cortiça pode ser feita

tanto para o isolamento térmico e acústico como para revestimento dos diferentes elementos construtivos sendo de destacar paredes, tetos e pavimentos (Gil, 2007).

A Figura 34 representa exemplos de placas de aglomerado de cortiça expandida.



Figura 34 – Amostras de diferentes placas de aglomerado de cortiça expandida (ICB) (adaptado de (Gil, 2015))

A condutibilidade da térmica da cortiça pode apresentar valores entre 0,037-0,043 W/(m.K), valores próximos aos da lã de rocha e de vidro (Kumar et al., 2020). Quanto à sua massa volúmica pode apresentar valores no intervalo 110-170 kg/m$^3$ (Schiavoni et al., 2016), sendo um material que apresenta usualmente valores de densidade superiores tanto aos poliestirenos como também relativamente à lã de vidro.

No caso do isolamento térmico da cortiça as suas características tornam-na atrativa. Sendo composta por células pequenas e fechadas, o fenómeno de convecção é reduzido, acontecendo de forma similar para a radiação, devido a repetidas absorções e reflexões da radiação incidente graças à sua parede celular (Pereira, 2015).

Barreca et al. (2016) estudaram as propriedades termofísicas de 6 amostras de placas de aglomerado de cortiça, em que a influência no isolamento térmico do tamanho dos grânulos, densidade e espessura foram tidos em conta. Com os resultados obtidos, os investigadores concluíram a boa prestação das placas constituídas por grânulos de cortiça, que, em alguns aspetos, se mostraram melhores do que os obtidos para a cortiça natural. As placas de aglomerado de cortiça apresentaram preços mais competitivos e uma boa eficiência quando comparados com placas constituídas por cortiça virgem, especialmente se não forem usados ligantes sintéticos (Barreca et al., 2016).

Em Portugal, o uso de aglomerado de cortiça expandida em sistemas ETICS tem vindo a ganhar dimensão assim como em diversos países europeus, apesar da sua recente introdução no processo construtivo (Silvestre et al., 2022).

O desempenho acústico de placas de cortiça foi estudado por Iannace et al. (2020). Foram realizadas medições, usando um tubo de impedância, e, para painéis de 1,5 mm foram obtidos bons valores para o coeficiente de absorção sonora nas médias frequências. Se for reduzida a lâmina de ar da parede, o valor do coeficiente de absorção é mais favorável para elevadas frequências (Iannaceet al., 2020).

Num estudo realizado por Gil (2007), destaca-se o uso de placas de cortiça para a correção acústica por absorção e diminuição do tempo de reverberação (eco) em determinados ambientes, sendo estas utilizadas como elemento de descontinuidade entre elementos rígidos e também como material para a redução de ruídos de impacto em pavimentos flutuantes.

A cortiça apresenta uma classe de resistência ao fogo E (Kumar et al., 2020), sendo, por isso, um material combustível. A composição química da parede celular da cortiça apresenta estabilidade térmica quando comparada com polímeros sintéticos como o poliestireno ou poliuretano, que se degradam e derretem a temperaturas comparativamente mais baixas (Pereira, 2015). A temperaturas na ordem dos 350 °C, a cortiça consegue manter a sua estrutura celular apesar de se começar a notar a expansão das suas células e a diminuição da sua parede celular (Pereira, 2015). Mesmo a temperaturas superiores a 2000 °C, a espinha dorsal da sua estrutura é mantida (Reculusa et al., 2006). Assim, torna-se possível o seu uso como camada de isolamento em caso de incêndio (Pereira, 2015).

Na avaliação dos impactes ambientais ao longo do ciclo de vida de diversos materiais de isolamento de Füchsl et al. (2022), a cortiça apresenta-se como um material desfavorável face à maioria, até mesmo quando comparado a materiais não renováveis. Algumas causas, referidas por Sierra-Pérez et al. (2016), estão relacionadas com diversas etapas da sua produção. A produção do granulado de cortiça implica a trituração que é responsável por mais de 60% dos impactes totais nesta etapa, sendo que, se a qualidade do granulado produzido for baixa, mais de 50% não é utilizado tornando-se desperdício (Sierra-Pérez et al., 2016). Os investigadores revelam que na avaliação do ciclo da cortiça existem 2 fatores que influenciam em grande medida os seus impactes negativos: o transporte (não tão relevante em Portugal pois produz cortiça) e o consumo de energia (eletricidade e diesel), tornando-se necessário tomar medidas para que o processo de produção seja mais eficiente (Sierra-Pérez et al., 2016). A melhoria da eficiência na sua produção pode melhorar as suas vantagens como o facto de ser um material reciclável (Barreca et al., 2016), não emitir COV quando arde, libertando apenas $CO_2$, tal como os compostos de madeira em geral (Dehane et al., 2015).

A cortiça é um produto com disponibilidade comercial em Portugal (Leroy Merlin, sem data). No entanto, é um produto caro quando comparado aos materiais convencionais (XPS, EPS e lãs minerais) (De Sousa, 2010).

## 3.6 Fibra de Madeira

A fibra de madeira é um material natural que pode ser obtida através das árvores, resíduos da indústria da madeira (serração) ou em operações de manutenção das florestas, para o seu uso como material de isolamento. Neste material, pode ser incorporada a lignina da madeira e o sulfato de alumínio, que funciona como pesticida e atua na proteção ao ataque por parte de insetos (Schiavoni et al., 2016).

Um exemplo da composição de painéis de isolamento em fibras de madeira é referido por Schulte et al. (2021), sendo estes constituídos por 83% de fibra de madeira, 6,3% de papel reciclado, 6% água, 2,4% de sulfato de alumínio (que funciona como retardante de incêndio), 1,3% de fibras de polietileno e polipropileno, e 1,2% de silicato de sódio (que atua como adesivo). A aplicação de placas de fibras de madeira (Figura 35) pode ser feita em coberturas, fachadas, tetos e paredes divisórias interiores (Duarte et al., 2022).



Figura 35 – Placas de fibra de madeira (Duarte et al., 2022)

No que diz respeito ao desempenho térmico, este material apresenta uma condutibilidade térmica que varia de acordo com a massa volúmica. Para valores mais baixos, entre 30-60 kg/m$^3$, a condutibilidade térmica é mais baixa, entre 0,037-0,038 W/(m.K), enquanto para massas volúmicas entre 110-250 kg/m$^3$ os valores da condutibilidade térmica são mais altos, 0,047-0,080 W/(m.K) (Grazieschi et al., 2021).

Troppová et al. (2015) realizaram experiências em placas de fibras de madeira e concluíram que, em paredes de fachada, o comportamento deste material é muito afetado pelas mudanças nas condições de temperatura e humidade, levando ao aumento da condutibilidade térmica do material. Também referem que o setor da produção e construção não prestam a devida atenção a este fator (Troppová et al., 2015).

O desempenho acústico de fibras de madeira foi estudado por Cherradi et al. (2021) no que toca à sua implementação em materiais compósitos. Os materiais analisados foram fibras alfa (resultantes de tratamentos alcalinos e mecânicos das hastes), proveniente de Marrocos e 3 tipos de fibras de madeira (faia, abeto e carvalho). A comparação entre materiais foi efetuada tendo em conta o valor do coeficiente de absorção ($\alpha$) que relaciona a absorção sonora com a intensidade incidente. No que toca a compósitos com fibras de abeto, os resultados foram satisfatórios para as frequências compreendidas entre 500-2000 Hz, sendo este o que apresentou menor variação na capacidade de absorver o som na gama de frequências considerada (Cherradi et al., 2021).

Tiuc et al. (2019) referem que a absorção sonora do material vai depender de diversos fatores, tais como a espessura, dimensão, conteúdo e natureza da fibra usada e também do espaço de ar entre o material e a parede rígida. Para baixas frequências a melhoria deste coeficiente passa pelo aumento do espaço de ar entre o material e a parede, sendo este fator mais significativo para amostras de espessura baixa (Tiuc et al., 2019).

A resistência ao fogo da madeira representa uma desvantagem, sendo um material associado à classe E (Kumar et al., 2020). Torna-se, assim, necessária a incorporação de produtos que impeçam a propagação das chamas. Sun et al. (2020) realizaram estudos onde usaram produtos como grafite expansível e fosfato de amónio em materiais compósitos constituídos por polipropileno e fibras de madeira. A cobertura com grafite permite fornecer uma camada de carbonização protetora de forma a acumular mais carvão durante a combustão do material. Para uma dupla camada com a distribuição de 2/3 entre grafite e fosfato, também ocorreu uma melhor prestação quando comparado com a distribuição uniforme destas camadas. A prestação mecânica do material também foi melhorada.

As fibras de madeira, sendo um material de origem natural, também apresentam bons indicadores no que toca à sua sustentabilidade. Schulte et al. (2021) compararam diversos materiais de origem natural, incluindo fibras de madeira e cânhamo, tendo em conta o valor por unidade funcional para resultados mais rigorosos. Foram estudados 18 indicadores e, em cerca de 16 deles, as fibras de madeira

apresentaram resultados satisfatórios. Füchsl et al. (2022) também corroboram o bom desempenho ambiental das fibras de madeira. As fibras de cânhamo são um dos poucos materiais que apresentam melhores resultados.

As fibras de madeira inserem-se no lote de materiais com maior potencial de melhoria das suas propriedades, juntamento com o cânhamo e a celulose, com mudança de aditivos e de ligantes para permitirem soluções ainda mais sustentáveis para o ambiente (Füchsl et al., 2022).

Em relação, aos custos este é um produto caro quando comparado aos referidos até agora, sendo apenas superado pela celulose nos custos iniciais de investimento (De Sousa, 2010).

## 3.7 Borracha

A borracha é um dos polímeros mais importantes produzidos em todo o mundo, sendo de destacar o seu uso como matéria-prima em mais de 40000 produtos (Mooibroek et al., 2000). A produção de borracha pode ser feita de forma natural ou artificial. A borracha natural pode ser obtida através da árvore da borracha, originária da América do Sul, sendo a sua produção artificial efetuada a partir de derivados do petróleo de onde se obtém a borracha dos pneus, por exemplo (Visionarium, 2013).

A condutibilidade térmica da borracha reciclada pode variar entre os 0,100-0,140 W/(m.K) (Schiavoni et al., 2016). Os valores obtidos são superiores aos materiais analisados até agora. Já quanto à sua massa volúmica, esta pode variar entre 500-930 kg/m$^3$ (Kumar et al., 2020).

A variação da condutibilidade térmica foi um dos parâmetros estudados por Abdel Kader et al. (2012) considerando a incorporação de diferentes percentagens de resíduos de borracha em borracha natural. Os resíduos de borracha são de pneus e foram recolhidos em estradas, com custos quase inexistentes. Os resultados apresentados mostraram que com o aumento do uso de resíduos a condutibilidade térmica global do composto de borracha obtido aumentava. O ponto positivo foi o facto de independentemente da temperatura utilizada nos testes, o isolamento térmico proporcionado por estes compostos não sofria alterações significativas, indicando uma possível utilização deste composto em locais com mudanças de temperaturas significativas. Abdel Kader et al. (2012) referem que a quantidade ideal de resíduos a utilizar é da ordem das 600 partes por 100 partes de borracha natural promovendo além de um bom isolamento térmico, boas propriedades mecânicas e uma redução de custos de 82% quando comparado ao uso de borracha natural.

Os desempenhos acústicos dos aglomerados de borracha foram estudados por Asdrubali et al. (2008). Inicialmente, foram referidos os principais parâmetros que influenciam a prestação destes materiais, destacando-se a dimensão dos agregados, o revestimento, o grau de compactação e a sua espessura. Das amostras testadas inicialmente, os aglomerados com grãos mais pequenos (Ø = 1 mm) mostraram-se como os melhores na absorção acústica. Foi constatado que quanto menor a viscosidade do revestimento melhor seria a sua compatibilização com os aglomerados, sendo a concentração ideal de revestimento de 10%, com um grau de consolidação entre os 10-15% (Asdrubali et al., 2008). Os investigadores verificaram que, quanto menor fosse a compactação da mistura, melhor a absorção sonora, sendo apenas necessário garantir a suficiente compactação para adquirir propriedades mecânicas adequadas. A espessura também foi referida como um fator importante, sendo que a melhoria das propriedades de absorção ocorria com o seu aumento, incluindo a baixas frequências. Logo, a espessura, deve ser escolhida para a gama de frequências em que se pretenda a absorção. A compatibilização da borracha com materiais de origem natural como celulose ou fibras de madeira também pode conduzir a bons resultados no desempenho acústico em estruturas de madeira, sendo necessária, no entanto, mais investigação (Balmori et al., 2024).

A resistência ao fogo a borracha é D-E (Kumar et al., 2020), logo é combustível. Mancel et al. (2022) estudaram a incorporação de resíduos plásticos e de borrachas (em percentagens de 10%, 15% e 20%) em painéis de aglomerado de madeira, de forma a observar se era possível melhorar a resistência ao fogo. A borracha utilizada foi separada em resíduos de borracha proveniente de tapetes e isolamentos e a proveniente de resíduos de pneus. O tempo de ignição foi analisado para as diferentes amostras, sendo superior para as amostras contendo resíduos de tapetes. O estudo conclui que estes resíduos poderiam ser usados em conjunto com painéis aglomerados nas soluções construtivas de paredes de separação de frações (Mancel et al., 2022).

A nível ambiental, os resíduos de borracha aumentam a cada ano devido principalmente à circulação automóvel, contribuindo para a poluição ambiental porque não é um material de fácil decomposição e o tempo que demora a sua degradação não é conhecido (Abdel Kader et al., 2012). No entanto, a borracha é um material que pode ser reciclado. Na avaliação do ciclo de vida dos materiais realizada por Füchsl et al. (2022), a borracha reciclada apresenta desvantagens face a materiais naturais como o caso da celulose e da cortiça.

A nível de preços, não foi encontrada informação (Pedroso et al., 2017). A Figura 36 apresenta um exemplo de manta de borracha usada para isolamento acústico.



Figura 36 – Manta de borracha para isolamento acústico a ruídos de impacto (adaptado de (Obras360, sem data))

## 3.8 Painéis compósitos de cimento com partículas de madeira

O painel compósito de cimento com partículas de madeira (Figura 37) é um material compósito constituído por uma mistura de cimento e madeira, designado por Cement Borded Particle Board (CBPB). Uma possível constituição de um painel em percentagem de peso seco é a seguinte: Cimento Portland (61,8%), aparas de madeira de pinho (22,7%), água (10,7%), aditivos não tóxicos (1,4%) e pigmento (3,4%) (Soares, 2024). A aplicação dos painéis compósitos de cimento com partículas de madeira pode ser efetuada em paredes, revestimentos de telhados e telhas, vedações e barreiras acústicas (Matoski et al., 2016).



Figura 37 – Exemplo de painel compósito de cimento com partículas de madeira (adaptado de (Bessa et al., 2018))

Quanto à sua condutibilidade térmica, os painéis compósitos de cimento com partículas de madeira apresentam um valor de 0,22 W/(m.K), mais elevado do que a generalidade dos materiais mencionados, tendo uma massa volúmica média de 1350 kg/m$^3$ (Soares, 2024).

O desempenho térmico e acústico dos painéis compósitos de cimento com aglomerado de madeira foi analisado por Wang et al. (2016) com a reciclagem de resíduos de madeira da construção e sem

formaldeído, podendo o material ser reutilizado. A nível de desempenho térmico, as propriedades da madeira possibilitaram um material de desempenho superior, por exemplo, quando usado agregado de areia no painel de betão com percentagem similar à madeira utilizada no painel de cimento. No entanto, o valor da condutibilidade térmica obtido foi superior (por pouca margem) em relação a um painel de resíduos de madeira maciça. No desempenho acústico, foi estudada a redução da transmissão de ruídos de impacto para frequências baixas e médias, na gama 32-3150 Hz. Os painéis de cimento com aglomerado de madeira apresentaram um desempenho superior face aos constituídos por betão em grande parte da gama de frequências, apesar dos resíduos de madeira serem mais efetivos a altas frequências.

A classe de resistência ao fogo dos painéis compósitos de cimento com partículas de madeira varia entre B e A2, sendo por isso um material com baixa inflamabilidade, podendo ser incombustível (Soares, 2024). A avaliação do ciclo de vida de diferentes painéis de cimento e aglomerado de cimento foi realizado por Akin et al. (2023), tendo sido realizados três estudos: o primeiro usando madeira natural; o segundo usando resíduos de madeira de construção e demolição; e o último utilizando resíduos de madeira de construção e demolição com um tratamento alcalino que visa melhorar as propriedades físicas e mecânicas do painel. Os resultados demonstraram que o GWP é elevado principalmente devido ao uso do cimento como camada de revestimento dos painéis. No estudo dois, foram constatados melhores resultados em relação à avaliação do ciclo de vida, seguido pelo estudo três (apresentou melhoria das propriedades mecânicas com 2% de hidróxido de sódio (NaOH) na solução alcalina) e pelo estudo um.

Em Portugal, os painéis compósitos de cimento com partículas de madeira também são comercializados (*Leroy Merlin*, sem data).

## 3.9 Cânhamo

O cânhamo industrial (*Cannabis Sativa)* é uma planta com um baixo teor de substâncias psicoativas, podendo ser cultivada de forma eficiente devido à sua tolerância a climas secos. Diferentes partes desta planta podem ser aproveitadas, as fibras exteriores, a parte interior, que é constituída por madeira, e também as suas sementes. As fibras exteriores passam por um processo de aglomeração, compressão e tratamento antifogo (Duarte et al., 2022). Na área da construção, este produto pode ser misturado com diferentes materiais como cal, argila ou amido com o fim de obter materiais isolantes de qualidade

(Dénes et al., 2019). O cânhamo pode ser utilizado tanto na forma de painéis (Figura 38), como na forma de lã para revestir paredes interiores e exteriores (Cânhamor, 2022).



Figura 38 – Placas de cânhamo (adaptado de (Duarte et al., 2022))

A condutibilidade térmica das fibras de cânhamo, em geral, pode variar entre os 0,038-0,060 W/(m.K) (Schiavoni et al., 2016). O desempenho térmico do cânhamo é mais baixo do que o dos materiais referidos nas subsecções anteriores. Estudos realizados por Gaujena et al. (2020) constataram que a água afeta de forma significativa a condutibilidade térmica deste material, referindo que para 20% de água na amostra a condutibilidade aumenta para o dobro. Gaujena et al. (2020) verificaram que a absorção da água é a sua grande desvantagem. Nas amostras a massa aumentou em 198% e o volume em 40%. Logo, o uso deste material deve ser realizado num ambiente controlado, com fraca precipitação e praticamente nenhum contacto com a água, pois uma vez em contacto com esta, torna-se muito difícil o material ficar completamente seco.

No que respeita à massa volúmica este material apresenta valores entre 20-90 kg/m$^3$ (Schiavoni et al., 2016). O desempenho acústico das esteiras do cânhamo foi estudado também por Gomes et al. (2020) e comparando ao XPS (50 mm de espessura), para paredes duplas, este material comportou-se melhor, tendo um índice de redução sonora de 58 dB e com menor espessura (40 mm) de material.

Estudos realizados por Mirski et al. (2018) estudaram o comportamento de painéis formados por folheados de bétula e fibra de cânhamo com 15 mm de espessura, com diferentes densidades, variando entre 300-1300 kg/m$^3$. As placas produzidas com fibras de cânhamo e densidades entre 500-900 kg/m$^3$ e folheado de bétula nas camadas exteriores apresentaram boas propriedades acústicas, no que respeita ao índice de redução sonora. Mirski et al. (2018) constataram que o a redução sonora era superior, principalmente a altas frequências (entre 30% e 45%), que dos painéis de fibras ou de lã mineral.

A resistência ao fogo também é uma desvantagem do cânhamo, sendo da classe E (Kumar et al., 2020). Naughton et al. (2014) incorporaram fibras de cânhamo em compostos de poliéster, concluindo que foi possível diminuir a quantidade de gases inflamáveis presentes devido à decomposição da hemicelulose

(polissacarídeo) que retarda a ignição dos componentes. Logo, a resistência ao fogo aumentou com o aumento da espessura e fração volumétrica das fibras. Apesar disso, também registaram o facto de ser inadequado a exposição destes materiais ao fogo, pois comprometem a integridade do edifício.

Em Portugal, a disponibilidade de cânhamo ainda é diminuta. Numa entrevista realizada por Ramos (2022), César Cardoso refere que já é possível a construção com o uso de cânhamo no país como matéria-prima para o betão, podendo também ser usado em conjunto com madeira estrutural.

Estudos realizados por Hult et al. (2022) para o preço de isolamento de cânhamo numa moradia na Suécia constataram que este material apresenta maiores encargos financeiros comparando com a celulose e a fibra de vidro, sendo destacado o facto de ser necessária maior espessura para obter o mesmo desempenho do que os materiais referidos.

## 3.10 Celulose

A fibra de celulose é composta por papel moído, tratado com compostos inorgânicos que visam atuar como retardantes de incêndio e também como inibidores de crescimento de fungos, sendo a consistência deste material comparável à do algodão (Lopez Hurtado et al., 2016). O papel utilizado é, normalmente, proveniente de jornais reciclados ou recuperados. Como a maiorias dos compostos lignocelulósicos, o papel de jornal é composto por uma mistura de hemiceluloses e lignina. O produto final pode vir na forma de painéis pré-fabricados ou a granel (Lopez Hurtado et al., 2016). A aplicação das fibras de celulose como material de enchimento pode ser efetuada em coberturas, paredes e áreas de difícil acesso (Duarte et al., 2022).

A Figura 39 mostra as fibras de celulose vistas ao microscópico.



Figura 39 – Vista microscópica de fibras de celulose, 10x ampliação (adaptado de (Lopez Hurtado et al., 2016))

No que respeita ao desempenho térmico os valores da condutibilidade térmica variam entre 0,037-0,042 W/(m.K) (Schiavoni et al., 2016). Análises realizadas por Pal et al. (2021) a diversos materiais no que toca à sua condutibilidade térmica permitiram verificar que os painéis de celulose apresentam valores bastante competitivos quando comparado a materiais convencionalmente mais utilizados como é o caso da cortiça ou da lã de vidro. A difusibilidade térmica foi também estudada por Pal et al. (2021). Esta mede a capacidade do material transferir o calor do lado mais quente para o menos quente. A difusibilidade térmica dos painéis de celulose foi aproximadamente 5 vezes mais baixa do que o obtido para cortiça e 18 vezes mais baixo comparativamente à lã de vidro (Pal et al., 2021). Assim, foi concluído que o desempenho das fibras de celulose sob condições dinâmicas de transferência de calor, como acontece no caso dos edifícios, é bastante superior ao dos materiais convencionais utilizados atualmente.

A massa volúmica da celulose pode variar entre 30-80 kg/m$^3$ (Schiavoni et al., 2016). No que toca ao desempenho acústico, quando usado em painéis, a elasticidade deste material permite o seu uso como material resiliente em pavimentos flutuantes. O estudo de materiais compósito de espumas em celulose foi efetuado por Nechita et al. (2018) de forma a comparar o desempenho acústico com o dos materiais convencionais (XPS/EPS). As propriedades estudadas foram as perdas por transmissão e os coeficientes de absorção, tendo em conta a composição das fibras e a sua massa volúmica. Os resultados obtidos em laboratório demonstraram o bom desempenho das fibras de celulose. A melhor prestação obtida foi para o material compósito com maior quantidade de fibras mais curtas e mais finas e constituído por fibras de celulose 100% recicláveis. De sublinhar que, na incorporação de mantas de celulose em paredes duplas, Pedroso et al. (2019), verificaram que este material apresentou, de todos os materiais analisados na presente dissertação, o índice de redução sonora mais elevado em paredes duplas (59 dB), sendo apenas superado pela espuma de poliuretano (60 dB).

No que diz respeito à resistência ao fogo deste material ele apresenta diversas classes, B-C-E, sendo a B e C classes que indicam materiais combustíveis, no entanto, com muito limitada ou limitada contribuição para o incêndio (Kumar et al., 2020). Sendo um material altamente inflamável requer tratamentos antes da sua instalação como forma de obter níveis aceitáveis de combustão e resistência latente (Lopez Hurtado et al., 2016).

Retardantes de incêndio tornam-se necessários também para este material. Li et al. (2017) inseriram nas fibras de celulose microcápsulas de óxido de magnésio (MgO) que mostram a simbiose entre estes materiais, pois a resistência aos ácidos é aumentada e é maior do que a apresentada pelo composto

puro de dióxido de magnésio. Li et al. (2017) compararam também as fibras de celulose não modificadas, com as alteradas (com incorporação de microcápsulas de óxido de magnésio), e constaram o melhor comportamento destas últimas. Este material é considerado um material inovador que pode ser aplicado em diversas indústrias.

O aspeto ambiental é também uma vantagem deste material. Füchsl et al. (2022) compararam diversos materiais convencionais e não convencionais. Em diferentes indicadores ambientais, este material de isolamento é o que apresenta melhor desempenho, por exemplo em comparação ao EPS, à lã de rocha e à lã de vidro. Apenas os materiais naturais como as fibras de madeira e o cânhamo possuem resultados comparáveis aos da celulose. Lopez Hurtado et al. (2016) também constataram a viabilidade a nível ambiental da celulose comparando-a com materiais convencionais.

Em Famalicão, existe uma empresa (Isorenel) que usa celulose projetada, com o uso de papel reciclado, para isolamento térmico e acústico. A aplicação é efetuada em paredes e pavimentos aumentando o isolamento acústico pela sua estrutura emaranhada (Isorenel, sem data). O custo deste material é elevado comparado a materiais convencionais de isolamento utilizados (De Sousa, 2010).

## 3.11 Lã de Ovelha

A utilização de lã de ovelha como material de isolamento pode ser feita em rolos, painéis semirrígidos ou em estado solto, podendo a sua aplicação ser feita em coberturas, tetos e paredes (Duarte et al., 2022). A condutibilidade térmica da lã de ovelha varia entre 0,038-0,054 W/(m.K) (Schiavoni et al., 2016). A lã de ovelha é um material bastante leve, com massa volúmica que varia entre 10-20 kg/m$^3$ (Kumar et al., 2020).

A Figura 40 mostra, do lado esquerdo, uma amostra da lã de ovelha, sendo a sua aplicação em obra efetuada como mostra a imagem do lado direito.



Figura 40 – Lã lde ovelha e a respetiva aplicação num edifício (adaptado de (Zach et al., 2012))

Estudos realizados por Zach et al. (2012) visaram estudar diversas propriedades da lã de ovelha. As amostras de lã de ovelha em geral eram constituídas por 60% de fibras de proteína animal, 15% de humidade, 10% de gordura (reduzida a 1% para os testes realizados), 10% de suor de ovelha e 5% de impurezas. As condições de temperatura para a obtenção de condutibilidade térmica foram de 10°C, 20°C, 30°C e 40°C. A humidade medida teve em conta o estado natural, estado seco, com secagem a 95°C no forno, e para o estado húmido. Também foi tida em consideração a massa volúmica. Os resultados obtidos mostraram que para um aumento de 50% da massa volúmica, a condutibilidade térmica foi subindo, cada vez de forma mais considerável, desde 15% para 10°C até 21% para 40°C (Zach et al., 2012). A menor variação de condutibilidade térmica acorreu para uma massa volúmica de 40 kg/m$^3$ (Zach et al., 2012).

Quanto ao desempenho acústico, Zach et al. (2012) realizaram experiências com amostras com quatro espessuras diferentes (20 mm, 30 mm, 40 mm e 60 mm). O coeficiente de absorção sonora foi estudado tendo em conta intervalos de três oitavas numa gama de frequências entre 100-3150 Hz. Os resultados mostraram que a frequência com maior absorção diminui com o aumento da espessura de isolamento, aumentando o valor ponderado do coeficiente de absorção sonora (Zach et al., 2012). Cálculos realizados demonstraram que a espessura ideal seria de 170 mm (Zach et al., 2012). Foi concluído pelos resultados experimentais que a lã de ovelha é um bom material de absorção acústica.

No que toca à resistência ao fogo, a lã de ovelha é considerada um produto de classe E (Schiavoni et al., 2016). Numa comparação entre as propriedades de materiais de isolamento, sendo estes EPS e lã de ovelha Dénes et al. (2019) constataram que, apesar de ambos os materiais apresentaram a mesma classe de resistência ao fogo, existem algumas diferenças na presença de chamas entre ambos, que devem ser consideradas. A lã não queima, apenas se carboniza a si mesma, não contribuindo para a expansão das chamas, o que já não acontece com o EPS que queima na presença de chamas. O referido

estudo revela que este comportamento da lã de ovelha se deve ao facto da sua elevada quantidade de nitrogénio não suportar a combustão.

Sendo a lã de ovelha um material de origem natural os impactes ambientais associados são uma das suas vantagens. Na comparação de diversos materiais de isolamento realizada por Füchsl et al. (2022), apresenta-se em desvantagem comparando ao cânhamo, celulose e cortiça. O ODP é um parâmetro em que a lã de ovelha se destaca pela negativa, podendo ser explicado pelo impacto do animal ao longo da sua vida, não deixando de ser referido que a elevada aplicabilidade desta lã pode compensar o seu impacto negativo (Dickson et al., 2021).

A não produção de materiais de isolamento à base de lã de ovelha em Portugal é uma desvantagem associada ao produto. Seria necessária importação de outros países como o caso do Reino Unido (De Sousa, 2010), que conduziria a um aumento de custos e também maiores impactes ambientais resultantes do seu transporte para território nacional.

## 3.12 Manta Acústica 1 (IMPACTODAN)

IMPACTODAN é uma membrana de espuma de polietileno reticulado (Figura 41). A estrutura de célula fechada confere a este produto boas propriedades mecânicas. A sua utilização concentra-se no isolamento acústico aos ruídos de impacto em pavimentos, sendo também referida a alta resistência à fadiga, boa resistência à humidade e a fácil instalação. A espessuras disponíveis no mercado são 5 ou 10 mm. O IMPACTODAN é constituído por 5% de matéria-prima reciclada (Danosa, sem data).



(a) (b)

Figura 41 – Mantas acústicas danosa (a) Impactodan (b) MAD (adaptado de (Danosa, sem data))

A condutibilidade térmica declarada varia entre 0,037 e 0,038 W/(m.K) para as espessuras de 5 e 10 mm respetivamente. A densidade do material varia entre os 23-29 Kg/m$^3$. Tendo em conta o desempenho acústico é um material que apesar de ser destacado o uso para ruídos de percussão, com

um índice $L'_{nT,w} < 58$ dB para 10 mm e $L'_{nT,w} < 60$ dB para 5 mm de espessura, também contribui para o isolamento a sons aéreos em pavimentos flutuantes (Danosa, sem data).

Esta membrana é usada para melhorar o isolamento a sons de percussão de pavimentos, em conjugação com lajetas flutuantes para as gamas de baixas, médias e altas frequências. A classe de resistência ao fogo é F (Danosa, sem data).

### 3.13 Manta Acústica 2 (MAD)

MAD (Figura 41) é um produto constituído por uma membrana betuminosa reforçada com cargas minerais, revestida em ambas as faces por polietileno de alta densidade. As espessuras totais podem ser de 2, 4 ou 6 mm. A nível de desempenho acústico, funciona como um elemento plástico entre elementos rígidos, sendo um eficaz substituto do chumbo, e tem um comportamento de ressonador de membrana (absorve baixas frequências). A sua utilização é efetuada entre elementos rígidos, tais como as placas de gesso laminado, tanto em elementos verticais como horizontais. Também pode ser utilizado entre elementos amortecedores para aumentar o isolamento geral do elemento, destacando-se a melhoria significativa do desempenho a baixas frequências. No caso de ruídos aéreos, é referida a melhoria de desempenho em partições de gesso laminado de 2 dB, 5 dB e 6 dB para as espessuras de 2 mm 4 mm e 6 mm (Danosa, sem data).

A resistência ao fogo é um dos aspetos em que este material se comporta de forma mais satisfatória tendo a classe C. A nível ambiental, tem cerca de 22% de matéria-prima reciclada na sua constituição. A nível comercial é possível a obtenção destes produtos em Portugal (*Leroy Merlin*, sem data).

### 3.14 Resumo das Características dos Materiais Analisados

Na Tabela 12, encontra-se a compilação, para os diferentes materiais, da condutibilidade térmica ($\lambda$), massa volúmica ($\rho$), coeficiente de absorção sonora ($\alpha$), classe de reação ao fogo (RF), resistência à difusão da água (DA) e o potencial de aquecimento global (PAG).

Tabela 12 – Parâmetros dos diferentes materiais estudados (adaptado de (Danosa, sem data; Grazieschi et al., 2021; Pásztory, 2021, Kumar et al., 2020; Papadopoulos,2005; Schiavoni et al., 2016, Soares, 2024; Zhao et al., 2022))

| Material | Parâmetro | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Condutibilidade térmica (λ) W/ (m.K) | Massa volúmica (ρ) (kg/m³) | Coeficiente de absorção sonora (α) (-) | Classe de reação ao fogo (RF) (-) | Resistência à difusão da água (DA) (μ) | Potencial de aquecimento global (PAG) (kg $Co_2$eq/kg) |
| EPS | 0,035-0,040 | 15-35 | 0,22-0,65 | E | 20-100 | 6,30-7,30 |
| XPS | 0,032-0,037 | 32-40 | 0,20-0,65 | E | 80-170 | 7,55 |
| Lã de rocha | 0,033-0,040 | 40-200 | 0,29-0,90 | A1-A2 | 1-1,3 | 1,05 |
| Lã de vidro | 0,030-0,050 | 13-100 | 0,45-0,80 | A1-A2 | 1-1,3 | 1,24 |
| Cortiça | 0,037-0,043 | 110-170 | 0,39-0,85 | E | 5-30 | 0,82 |
| Fibra de madeira | 0,037-0,038<br>0,047-0,080 | 30-60<br>110-250 | 0,10-0,32 | E | 1-5 | 0,12 |
| Borracha | 0,100-0,140 | 500-930 | 0,20-0,8 | D-E | 14 | 3,76 |
| Painel compósito de cimento e partículas de madeira | 0,220 | 1350 | * | B-A2 | * | * |
| Cânhamo | 0,038-0,060 | 20-90 | 0,52-0,60 | E | 1-10 | 0,14 |
| Celulose | 0,037-0,042 | 30-80 | 0,53-0,90 | B-C-E | 1 | 0,31-1,83 |
| Lã de ovelha | 0,038-0,054 | 10-20 | 0,056-1,12 | E | 4-5 | 0,12 |
| Manta acústica 1 | 0,037-0,038 | 23-29 | * | F | * | * |
| Manta acústica 2 | * | * | * | C | * | * |
| *Valor não encontrado | | | | | | |

Como forma de complemento, são apresentados em anexo informações complementares que permitiram avaliar os materiais absorventes. No Anexo 5, refere-se o desempenho de alguns materiais absorventes quando aplicados em edifícios em madeira. No Anexo 6, são referidos custos dos materiais absorventes obtidos com base no gerador de preços da CYPE (CYPE Ingenieros, 2023), sendo diferenciada a sua utilização em paredes, lajes e também da sua função no elemento construtivo (isolamento térmico, acústico ou térmico e acústico). Os preços, em €/m², são referentes à última atualização do programa (outubro de 2023). Só são referidos os preços dos materiais encontrados no gerador de preços. No Anexo 7, é apresentado uma tabela com a matéria-prima associada a cada material e também os locais das unidades fabris onde são produzidos. No Anexo 8, são apresentados os resultados da pesquisa das declarações ambientais de produto realizada, de forma a estabelecer também uma comparação entre os impactes ambientais dos materiais sobretudo na categoria A1-A3 (berço ao portão) por kg de material.

# 4. Avaliação final dos materiais absorventes

Neste capítulo, realiza-se a avaliação final dos materiais absorventes estudados. Serão tidos em conta o desempenho térmico e acústico dos materiais, a sua resistência ao fogo, impactes ambientais associados, custos e disponibilidade em Portugal. Com base nos parâmetros e informação apresentados tanto do Capítulo 3 como nos Anexos, é realizada uma avaliação qualitativa dos materiais. Consoante o peso estabelecido por cada parâmetro, será estabelecida uma pontuação para cada material absorvente.

## 4.1 Classificação dos materiais absorventes

Inicialmente, foram atribuídos pesos a cada parâmetro tendo por base a pesquisa realizada e também a importância de cada um deles num edifício em madeira. Tendo por premissa que a garantia do conforto térmico e acústico é fundamental para uma qualidade do ambiente interior dos edifícios e também a sua funcionalidade, estes dois parâmetros representam um peso maior. O facto também destes dois parâmetros apresentarem mais informações relativas ao desempenho torna-os mais suscetíveis de uma análise mais aprofundada e rigorosa. Sendo necessidade de combater as alterações climáticas e de descarbonização tanto a nível nacional como global uma dod objetivos do trabalho realizado, justifica um peso superior do desempenho ambiental, face à resistência ao fogo e custos, além deste parâmetro ter também em conta a produção local e disponbibilização comercial dos materiais como fatores importantes na diminuição dos impactes ambientais decorrentes do transporte. No que toca à resistência ao fogo e custos, foram considerados pesos iguais. A Tabela 12 apresenta a distribuição de pesos para os diferentes parâmetros.

Tabela 13 – Distribuição dos pesos para os diferentes parâmetros analisados

| Parâmetro | Peso atribuído (%) |
|---|---|
| Desempenho Térmico | 30 |
| Desempenho Acústico | 30 |
| Desempenho Ambiental | 20 |
| Resistência ao Fogo | 10 |
| Custos | 10 |

Depois da atribuição dos pesos para cada parâmetro, procedeu-se à sua avaliação qualitativa. De modo a quantificar a prestação dos diferentes materiais foi atribuída uma classificação para cada parâmetro estudado. A pontuação varia entre 0 e 5. A distribuição das pontuações foi a seguinte: cinco pontos para um desempenho Muito Bom (MB); quatro pontos para Bom (B); três pontos para o desempenho

Intermédio (I); dois pontos para um Mau desempenho (M); e um ponto para um desempenho Muito Mau (MM). Nos parâmetros em que não se obtiveram informações relativas aos materiais, estes assumem a classificação Intermédio, para não penalizar os materiais por falta de informação disponível. De seguida, é indicado como se processa a classificação qualitativa dos materiais em função dos parâmetros:

**Desempenho térmico:** Caracterizado em função tanto dos das características físicas do material (condutibilidade térmica e resistência à difusão da água) e o seu efeito no isolamento térmico dos elementos construtivos. O valor da contabilidade térmica considerada é o mais elevado quando é apresentado em intervalo. Para a resistência à difusão da água é o valor mais baixo o considerado:

- **Muito Bom:** Condutibilidade Térmica (λ) igual ou inferior a 0,040 W/(m.K) e resistência à difusão de água (μ) igual ou superior a cinco e bons resultados experimentais;
- **Bom:** Condutibilidade Térmica (λ) igual ou inferior a 0,045 W/(m.K) e resistência à difusão de água (μ) igual ou superior a três e resultados experimentais satisfatório;
- **Mau:** Condutibilidade Térmica (λ) igual ou inferior a 0,050 W/(m.K) e resistência à difusão de água (μ) igual ou superior a dois e resultados experimentais medianos;
- **Muito Mau:** Condutibilidade Térmica (λ) superior a 0,050 W/(m.K) e resistência à difusão de água (μ) igual ou superior a um e resultados experimentais pouco satisfatórios.

**Desempenho acústico:** Caracterizado de forma similar ao desempenho térmico, tendo em conta a absorção sonora do material e a melhoria do desempenho que provoca no isolamento a sons aéreos e de percussão de uma solução base. Neste parâmetro, será dada importância superior aos resultados experimentais face à sua absorção sonora:

- **Muito Bom:** Bons resultados experimentais (contribui para a melhoria do isolamento da solução construtiva em que é utilizado no isolamento a sons aéreos e de percussão e coeficiente de absorção sonora (α) superior a 0,5;
- **Bom:** Resultado experimentais satisfatórios (contribui para a melhoria do isolamento da solução construtiva em que é a utilizado a sons aéreos ou de percussão) no isolamento a sons aéreos e/ou percussão e coeficiente de absorção sonora (α) superior a 0,4;
- **Mau:** Resultado experimentais medianos (contribui de forma pouco significativa para o isolamento da solução construtiva em que é utilizado a sons aéreos ou de percussão) e coeficiente de absorção sonora (α) superior a 0,2;
- **Muito Mau:** Resultados experimentais pouco satisfatórios (não contribui de para o isolamento da solução construtiva em que é utilizado a sons aéreos e percussão) e coeficiente de absorção sonora (α) superior a 0,1.

**Desempenho Ambiental:** Tem em conta o parâmetro relativo ao potencial de aquecimento global (Tabela 12), os valores nas categorias de impacte ambiental apresentadas no Anexo 8, possibilidade do material ser reciclado, a produção e disponibilidade comercial em Portugal.

- **Muito Bom:** Valor do potencial de aquecimento global inferior a um, possibilidade de o material ser reciclado, produzido em Portugal e com elevada disponibilidade comercial em território nacional;
- **Bom:** Valor do potencial de aquecimento global entre um e três (ambos os valores incluídos), possibilidade de o material ser reciclado, produzido em Portugal, mas com pouca disponibilidade comercial em território nacional;
- **Mau:** Valor do potencial de aquecimento global entre três e seis (excluído o valor três os valores incluídos), sem possibilidade do material ser reciclado, não é produzido em Portugal, mas com disponibilidade comercial em território nacional;
- **Muito Mau:** Valor do potencial de aquecimento global superior a seis, sem possibilidade do material ser reciclado, não produzido em Portugal (para uso na construção) e com pouca ou inexistente disponibilidade em território nacional.

**Resistência ao fogo:** Tem em conta a classificação de resistência ao fogo (combustível ou incombustível) e também os resultados experimentais nos estudos mencionados na presente dissertação. Para a classificação da resistência ao fogo, foi considerado o parâmetro mais desfavorável da Tabela 11:

- **Muito Bom:** Classe A1/A2 de resistência ao fogo e bom desempenho nos resultados experimentais nos estudos mencionados na presente dissertação;
- **Bom:** Classe B de resistência ao fogo e desempenho satisfatório nos resultados experimentais;
- **Mau:** Classes C/D de resistência ao fogo e desempenho mediano nos resultados experimentais;
- **Muito Mau:** Classes E/F de resistência ao fogo e desempenho pouco satisfatório nos resultados experimentais.

**Custos:** Os custos têm por base os valores apresentados no Anexo 6 para os materiais enquadrados em diferentes sistemas e elementos construtivos e também a comparação entre os custos e produção realizada no capítulo 3. O custo em função do desempenho térmico e/ou acústico será também avaliado. Para os materiais em que não foi encontrado o seu valor no gerador de preços, a comparação foi realizada tendo em conta principalmente os custos de produção:

- **Muito Bom:** Preço abaixo de 10 €/m$^2$ no gerador de preços, baixos custos de produção e desempenho térmico e/ou acústico satisfatório;

- **Bom:** Preço abaixo de 10 €/m² no gerador de preços, custos médios de produção e desempenho térmico e/ou acústico satisfatório;
- **Mau:** Preço superior a 10 €/m² no gerador de preços, custos médios de produção e desempenho térmico e/ou acústico mediano;
- **Muito Mau:** Preço superior a 10 €/m² no gerador de preços, custos altos de produção e desempenho térmico e/ou acústico pouco satisfatório.

Com base na avaliação qualitativa dos materiais foram distribuídas as pontuações para cada parâmetro de cada material. O cálculo que define a pontuação final é feito através do somatório do produto entre o peso de cada parâmetro (%) e a sua pontuação no respetivo parâmetro. A classificação dos materiais foi efetuada consoante a sua pontuação. Os materiais com pontuação igual foram considerados na mesma posição. classificativa.

De seguida, apresentam-se os fatores que contribuíram para a atribuição de uma classificação superior/inferior de alguns materiais apesar do obtido relativamente aos parâmetros:

- **EPS:** No parâmetro relativo ao desempenho ambiental, foi melhorada a classificação de mau para intermédio pois o material é reciclável (Cozzarini et al., 2020);
- **XPS:** No parâmetro relativo ao desempenho ambiental, foi melhorada a sua classificação de muito mau para intermédio, pois é um material reciclável (*Fibran Energy Shield*, sem data);
- **Lã de rocha:** No parâmetro relativo ao desempenho térmico, apesar da pouca resistência à difusão da água, os resultados experimentais apresentados por Karamanos et al. (2008) justificam a sua classificação com o nível bom. Já para o desempenho acústico, a classificação foi boa face à sua capacidade de absorção sonora (Hongisto et al., 2022);
- **Lã de vidro:** No parâmetro relativo ao desempenho térmico, apesar de ter também pouca resistência à difusão da água, a classificação muito boa justifica-se pelo seu bom isolamento térmico a longo prazo (Kyoung-Woo et al., 2014);
- **Cortiça:** Apesar de se enquadra no bom devido à sua condutibilidade térmica, a boa resistência à difusão da água e bom desempenho térmico de acordo com o estudo de Barreca et al. (2016), justificam a sua classificação com muito bom. Na resistência ao fogo, apesar da classificação E, a cortiça foi classificado como material mau, pois apresenta estabilidade térmica a temperaturas elevadas (Pereira, 2015);
- **Borracha:** O bom desempenho acústico da borracha experimentalmente demonstrado por Asdrubali et al. (2008) justifica a melhoria da sua classificação de mau para bom. A borracha

pode ser reciclada logo no desempenho ambiental a classificação foi melhorada de mau para intermédio (Schiavoni et al., 2016).

- **Painel compósito de cimento e partículas de madeira:** O bom desempenho acústico dos painéis revelado no estudo de Wang et al. (2016), contribui para a sua classificação como bom;
- **Cânhamo:** No desempenho térmico foi considerado muito mau devido à pouca resistência quando está em contacto com a água (Gaujena et al., 2020). No desempenho acústico apesar do elevado coeficiente de absorção sonora do cânhamo, foi dada a classificação bom devido aos resultados experimentais terem evidenciado a sua boa prestação principalmente a elevadas frequências (Mirski et al., 2018);
- **Celulose:** Apesar da baixa resistência à difusão da água, o bom desempenho no isolamento térmico justifica a classificação como bom (Pal et al., 2021);
- **Lã de ovelha:** No parâmetro relativo ao desempenho térmico, apesar a baixa condutibilidade térmica, foi considerada a classificação mau devido aos resultados experimentais nos estudos de Zach et al. (2012). Já relativamente ao desempenho acústico, apesar da absorção sonora variar de forma significativa, os resultados experimentais justificaram a classificação como bom (Zach et al., 2012);
- **Manta acústica 1:** No parâmetro relativo ao desempenho acústico, foi considerado muito bom devido à prestação no isolamento acústico a ruídos de impacto em soluções de lajetas flutuantes nas diferentes gamas de frequências, também contribuindo para a redução da transmissão de sons aéreos (Danosa, sem data);
- **Manta acústica 2:** No parâmetro relativo ao desempenho acústico, foi considerado muito bom devido à prestação no isolamento acústico, especialmente a baixas frequências entre elementos rígidos (Danosa, sem data).

A Tabela 14 apresenta a avaliação qualitativa efetuada para os parâmetros definidos. A Tabela 15 apresenta a pontuação final e respetiva classificação dos materiais absorventes estudados em função da sua pontuação.

Tabela 14 – Avaliação qualitativa dos materiais absorventes com base nos parâmetros definidos

| Material | Avaliação | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Desempenho térmico | Desempenho acústico | Desempenho ambiental | Resistência ao fogo | Custos |
| EPS | MB | MM | I | MM | MB |
| XPS | MB | MM | I | MM | MB |
| Lã de rocha | B | B | B | MB | B |
| Lã de vidro | MB | B | B | MB | B |
| Cortiça | MB | B | MB | M | B |
| Fibra de madeira | M* | MM | MB | MM | B |
| Borracha | MM | B | I | MM | I |
| Painel compósito de cimento e partículas de madeira | MM | B | B | B | MM |
| Cânhamo | MM | B | B | MM | M |
| Celulose | B | MB | B | MM | B |
| Lã de ovelha | M | B | B | M | MM |
| Manta acústica 1 | I | MB | I | MM | MB |
| Manta acústica 2 | I | MB | B | M | M |
| *Considerado o valor mais baixo do parâmetro λ para a fibra de madeira com maior condutibilidade térmica | | | | | |

Legenda: MB - Muito bom; B - Bom; I - Intermédio; M - Mau; MM - Muito Mau

Tabela 15 – Pontuação e classificação final dos materiais absorventes com base nos parâmetros definidos

| Material | Pontuação final | Classificação final |
|---|---|---|
| EPS | 3,0 | 7 |
| XPS | 3,0 | 7 |
| Lã de rocha | 4,1 | 3 |
| Lã de vidro | 4,4 | 1 |
| Cortiça | 4,3 | 2 |
| Fibra de madeira | 2,4 | 13 |
| Borracha | 2,5 | 12 |
| Painel compósito de cimento e partículas de madeira | 2,8 | 10 |
| Cânhamo | 2,6 | 11 |
| Celulose | 4,0 | 4 |
| Lã de ovelha | 2,9 | 9 |
| Manta acústica 1 | 3,6 | 5 |
| Manta acústica 2 | 3,6 | 5 |

Pela análise da Tabela 15, são destacados três materiais: a lã de vidro, a lã de rocha e a cortiça. A lã mineral e a cortiça são materiais que agregam a capacidade de isolamento térmico e acústico, como também são materiais produzidos e com disponibilidade comercial em Portugal, logo foram os considerados para o catálogo presente no Anexo 9. De forma a ser realizada uma análise mais detalhada, as Figuras 42, 43 e 44 apresentam o gráfico em radar para o desempenho de cada um dos materiais.

Para a lã de rocha, existem duas características que se destacam: a sua resistência ao fogo e disponibilidade em Portugal (Figura 42). A resistência ao fogo é de destacar graças ao facto de ser um material incombustível, logo proporciona maior segurança em edifícios, como o caso dos de madeira onde este aspeto é um fator importante. A disponibilidade em Portugal é se sublinhar também tanto por ser um material vendido frequentemente em superfícies comerciais e, em especial, é produzido localmente, tendo por isso um bom desempenho ambiental. A lã de rocha não tem um parâmetro se destaque negativamente (muito mau ou mau). A boa prestação no desempenho térmico e acústico influenciou a superioridade deste material face à maioria dos estudados.

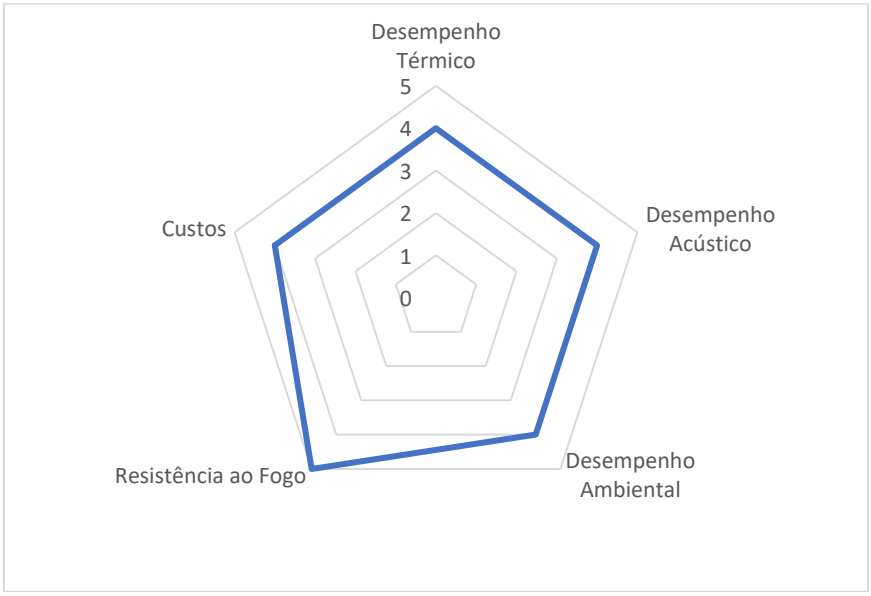



Figura 42 – Avaliação da Lã de rocha

A lã de vidro apresentou a melhor classificação entres os materiais estudados (Figura 43). Os espetos que se destacam foram o desempenho térmico e a resistência ao fogo. A lã de vidro tem uma condutibilidade térmica mais baixa na generalidade face aos restantes materiais além do seu bom comportamento a longo prazo. O desempenho acústico foi bom quando utilizado em soluções construtivas. O material não apresentou aspetos muito negativos, o que beneficia a sua classificação.

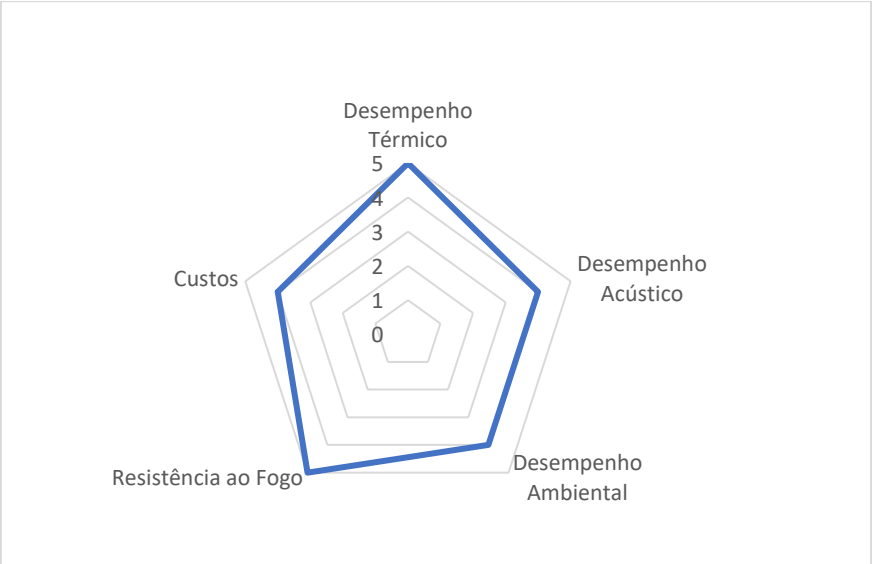



Figura 43 – Avaliação da Lã de Vidro

A cortiça é um dos três melhores materiais na sua avaliação (Figura 44). As principais características a destacar são o seu desempenho térmico e o desempenho ambiental. A nível do desempenho térmico, destaca-se a melhor resistência à humidade em comparação com os outros materiais naturais, tornando-o um bom isolante. Ser produzido em Portugal é uma vantagem em destaque. Como maior desvantagem tem a resistência ao fogo, necessitando de tratamento para a melhoria da sua prestação.

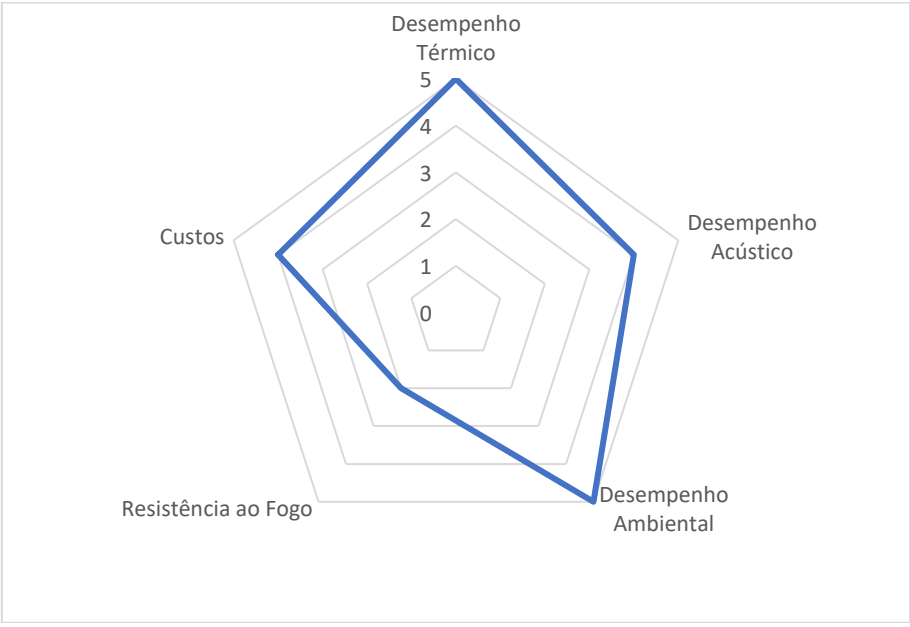



Figura 44 – Avaliação da Cortiça

Em relação ao restantes materiais analisados também se podem tirar algumas conclusões. Relativamente aos poliestirenos, estes apresentam duas características bastante negativas, sendo estas a resistência ao fogo e o seu desempenho acústico. Nos pontos positivos o EPS destaca-se na disponibilidade do mercado, sendo muito utilizado, principalmente para isolamento térmico. Já o XPS

tem como aspeto positivo o desempenho térmico, sendo um material que na presença de humidade se comporta de forma muito satisfatória. Os painéis de fibras de madeira destacaram-se principalmente no aspeto ambiental. O cânhamo e a lã de ovelha obtiveram maior destaque no desempenho acústico e ambiental, apesar de não terem obtido classificação MB em nenhum parâmetro, O painel compósito de cimento e partículas de madeira teve como aspeto negativo o seu custo elevado. O painel compósito de cimento e partículas de madeira apresentam bom desempenho em algumas categorias, no entanto não se destacaram em nenhuma delas. A borracha destacou-se negativamente, principalmente pela sua baixa resistência ao fogo e também a baixa disponibilidade em Portugal, que prejudica o seu desempenho ambiental.

A lã de ovelha teve como destaque negativo a produção para uso em construção inexistente em Portugal. Já a celulose destacou-se no isolamento acústico, apresentando bom desempenho em diversos parâmetros. Nos materiais de origem natural analisados é necessária uma investigação mais aprofundada de modo a obter informação relativa ao seu desempenho em soluções construtivas para edifícios de madeira. Já nas mantas acústicas o desempenho acústico foi evidenciado, no entanto nas restantes categorias, apenas a manta acústica 1 se destacou no custo mais baixo.

# 5. Caso de estudo

Neste capítulo, é apresentado um caso de estudo representativo de edifícios residenciais tipo, considerando para este trabalho que este se localiza na cidade de Braga. As soluções construtivas e as alterações efetuadas ao edifício tipo foram desenvolvidas no programa *Autocad* (Autodesk, 2023). Os cálculos e simulações foram realizados com o uso do programa *Cypetherm SCE-HAB* CYPE Ingenieros (2024b), para a análise do desempenho térmico, permitindo o cálculo do coeficiente de transmissão térmica, disponibilizando também diversas informações à cerca dos diferentes materiais. O programa *Acoubat* CYPE Ingenieros (2024a), para a análise do desempenho acústico das soluções construtivas, sendo um programa que permite o cálculo das transmissões marginais entre compartimentos. Também apresenta soluções testadas em laboratório de diferentes fornecedores com a caracterização de diversos parâmetros, como coeficiente de absorção sonora, índice de redução sonora, índice de isolamento a sons de percussão entre outros, para as diferentes frequências.

## 5.1 Caracterização do edifício e elementos em estudo

Para a caracterização do edifício, importa salientar que nesta dissertação não foi estudado o desempenho do edifício a nível estrutural, focando apenas na vertente do desempenho térmico e acústico dos elementos construtivos estudados. O edifício, com 3 andares, possui um apartamento por piso, com dois quartos, sala, instalação sanitária, cozinha, lavandaria e escadas de acesso aos pisos. A estrutura do edifício será em madeira a partir da altura do solo apoiada sobre uma subestrutura de fundações efetuadas em betão armado (Tenório, 2022). De forma a simplificar o caso de estudo, foi considerado que o edifício adjacente é similar ao estudado, sendo considerado espelhado em relação ao edifício tipo, com as mesmas características tanto no que toca à divisão dos espaços como as suas áreas. A Figura 45 representa a planta do piso 1 do edifício estudado.

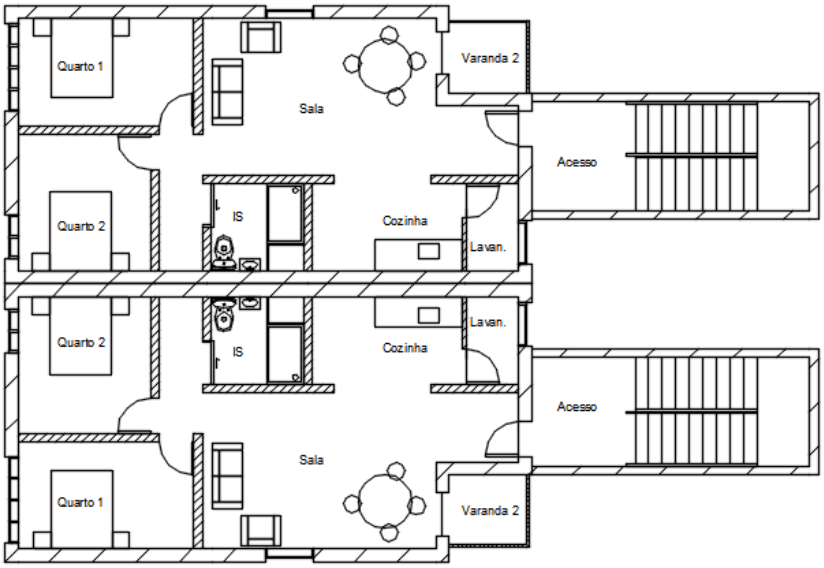



Figura 45 – Planta do piso 1 do edifício tipo estudado

No caso de estudo, foram analisados três elementos construtivos. A parede exterior, de fachada, a parede meeira que separa o quarto do edifício adjacente e por último a laje de separação entre os pisos do edifício com vista à verificação do seu cumprimento relativamente às normas portuguesas tanto do Manual SCE Direção-Geral de Energia & Geologia (2021), como do RRAE (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008). A Figura 46 mostra a localização dos elementos construtivos alvos de análise.

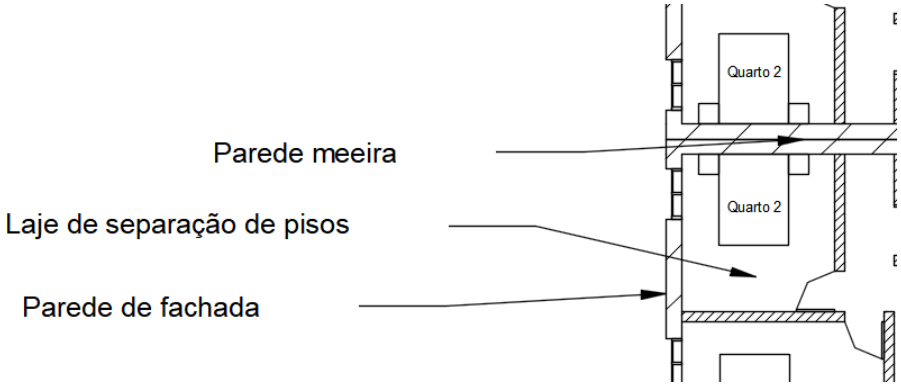



Figura 46 – Localização dos elementos construtivos em análise

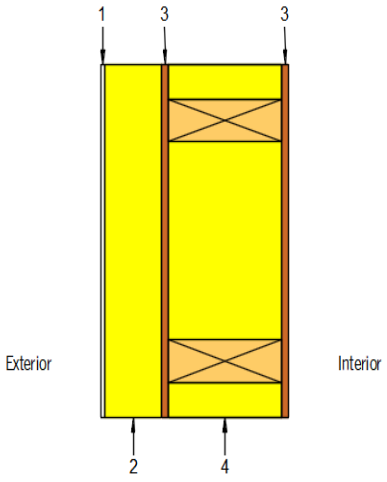
Na análise do edifício serão consideradas as mesmas soluções construtivos para toda a sua envolvente quer para as paredes quer para a laje. Seguidamente serão apresentadas as soluções construtivas utilizadas no edifício. A escolha das diferentes soluções foi condicionada pela apresentação dos gráficos relativos ao desempenho isolamento sonoro, tanto para sons aéreos como de percussão, para as diferentes gamas de frequências. A lã de rocha foi o material absorvente escolhido face á localização da sua unidade fabril no distrito do Porto, o distrito mais próximo de Braga no que toca aos materiais

presentes no catálogo. No Anexo 10, apresentam-se as principais características de alguns materiais utilizados para as soluções construtivas de paredes e laje das soluções em madeira que foram alvo de estudo no edifício tipo. Além da da análise do desempenho térmico e acústico das soluções em madeira também foram estabelecidas e analisadas soluções convencionais de modo a estabelecer uma comparação quanto ao valor do U e isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão, e verificar o cumprimento dos requisitos nacionais para ambas as vertentes.

### Soluções construtivas para edifícios leves – Soluções em madeira

- **Parede de Fachada**

Para a parede de fachada (Figura 47), foi utilizada uma solução que é constituída por um sistema ETICS. A estrutura é composta por barrotes de madeira (60X200 mm$^2$), sendo a caixa de ar preenchida com duas mantas de lã de rocha com 100 mm. Os barrotes de madeira são colocados a uma distância de 625 mm entre eles (Nusser et al., 2020). O isolamento exterior foi colado às placas OSB e adicionalmente fixado com ancoragens para fachadas (Nusser et al., 2020). Tendo em conta os materiais utilizados e os seus dados presentes no Anexo 10, como a densidade e a espessura, foi possível estimar a massa por unidade de área da parede de fachada.




1 – Reboco 7 mm
2 – Lã mineral (lã de rocha) 100 mm
3 – Placa OSB 12 mm
4 – Barrote de madeira com isolamento em lã de rocha 200 mm

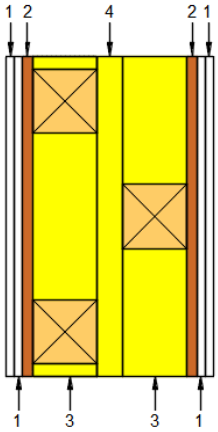
Espessura da parede = 0,331 m
Massa por unidade de área = 63,4 Kg/m$^2$

Figura 47 – Caracterização da parede de fachada (adaptado de (Nusser et al., 2020))

- **Parede Meeira**

Para a parede de separação de frações (Figura 48) foi utilizada uma solução similar à utilizada por Muellner et al. (2008), tendo como revestimento exterior duas placas de gesso cartonado com 12,5 mm, uma placa OSB com 15 mm, sendo a estrutura de madeira composta por barrotes de madeira de pinho

(secção 100x100 mm²), revestidos por lã de rocha. A caixa de ar da parede é preenchida também por uma placa de  lã de rocha com 40 mm de espessura. Para a solução de parede meeira foi estimada a massa por unidade de área tendo em conta os materiais usados que constam no Anexo 10, visto que no estudo realizado por Muellner et al. (2008) não terem sido reveladas as massas das diversas camadas.



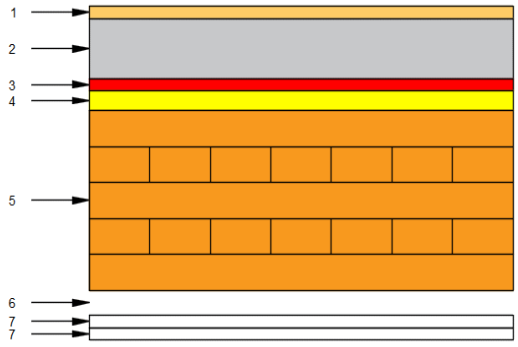

1 – Placa de gesso cartonado 12,5 mm
2 – Placa OSB 15 mm
3 – Estrutura de madeira, envolvida em lã mineral (lã de rocha) 100 mm
4 – Lã mineral (rocha) 40 mm

Espessura da parede = 0,320 m
Massa por unidade de área = 96,2 Kg/m²

Figura 48 – Caracterização da parede meeira (adaptado de (Muellner et al., 2008))

- Laje de Separação de Frações

Para a laje de separação entre frações (Figura 49) foi considerada a solução utilizada por Vardaxis et al. (2022). No teto foram considerados duas placas de gesso cartonado com 12,5 mm, tendo a caixa de ar 25 mm de espessura. Foi utilizado um painel CLT com cerca de 180 mm que tem a função estrutural. Acima, foi colocada lã de vidro como um piso resiliente situado acima desta. Acima do piso resiliente, localiza-se uma camada de regularização em betonilha. O revestimento final da laje é constituído por uma placa de pinho com 13 mm de espessura. Para a lã de vidro e piso resiliente, foram utilizadas as densidades presentes no estudo realizado por Vardaxis et al. (2022), para estimar a massa por unidade de área da laje de separação de frações, sendo para os restantes materiais utilizados os valores presentes no Anexo 10.



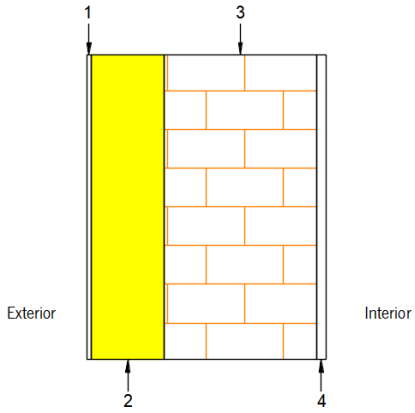

1 – Placa de pinho 13 mm
2 – Betonilha 60 mm
3 – Piso resiliente 12 mm
4 – Lã de vidro 20 mm
5 – Painel CLT 180 mm
6 – Caixa de ar 25 mm
7 – Placa de gesso cartonado 12,5 mm

Espessura da laje = 0,335 m
Massa por unidade de área = 250 Kg/m²

Figura 49 – Caracterização da laje de separação de frações (adaptado de (Vardaxis et al., 2022))

- **Parede de Fachada**

Na Figura 50 apresenta-se uma solução convencional para a parede de fachada, uma parede de alvenaria de tijolo cerâmico com ETICS, com a massa por unidade de área estimada tendo em conta os materiais presentes no ITE-50 (Dos Santos et al., 2006). A espessura utilizada no sistema ETICS não é comum em Portugal, sendo mais utilizado um valor entre 60 e 100 mm, no entanto, esta solução foi utilizada devido à disponibilidade de informação relativa ao desempenho acústico, por frequência.



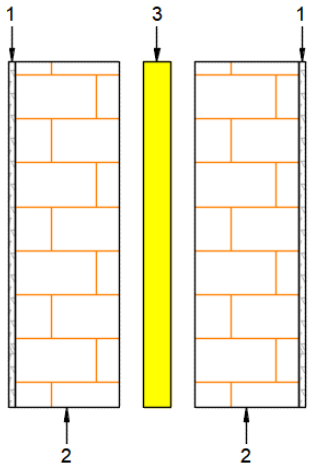

1 – Argamassa de reboco 7 mm
2 – Lã de Rocha 120 mm
3 – Alvenaria de tijolo 250 mm
4 – Reboco 15 mm

Espessura da parede = 0,392 m
Massa por unidade área = 241,7 Kg/m$^2$

Figura 50 – Configuração da parede de fachada em alvenaria (adaptado de (Scamoni et al., 2021))

- **Parede Meeira**

Na Figura 51 é apresentada a configuração da parede meeira ou interior estudada, com uma solução convencionalmente usada em Portugal. A parede utilizada é dupla de tijolo cerâmico com isolamento em lã de rocha na caixa de ar e reboco como revestimento final de ambos os lados. A massa por unidade de área foi estimada tendo em conta os materiais presentes no ITE-50 (Dos Santos et al., 2006).



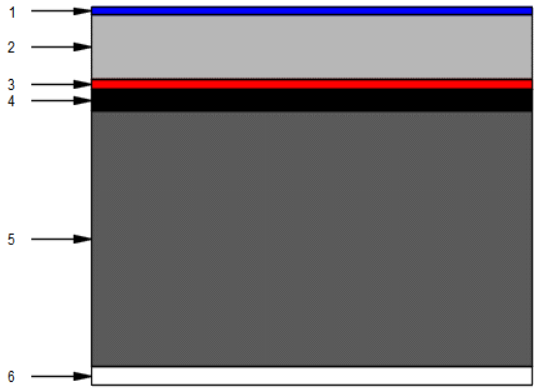

1 – Argamassa de reboco 10 mm
2 – Alvenaria de tijolo 150 mm
3 – Caixa de ar de 110 mm preenchida com lã de rocha 40 mm
4 – Lã de rocha 40 mm

Espessura da parede = 0,430 m
Massa por unidade área= 381,3 Kg/m$^2$

Figura 51 – Configuração da parede meeira ou interior em alvenaria (adaptado de (Imperalum, sem data))

- Laje de Separação de Frações

Por último, na Figura 52 é apresentada a configuração para a laje de separação de frações constituída por uma laje aligeirada com blocos cerâmicos de 200 mm com uma camada de compressão de 40 mm. O elemento resiliente é constituído por uma lâmina flexível de polietileno reticulado não espumado (Da Silva, 2009). A lajeta de betão é armada com uma rede eletrossoldada. Para se obter a estimativa da massa por unidade de área foram usados os valores do ITE-50 Dos Santos et al. (2006) e de IBERA Indústria de betão, (2017) para a betonilha, considerando a sua espessura de 20 mm.




1 – Revestimento cerâmico ou pétreo 7 mm
2 – Lajeta de betão armado 60 mm
3 – Elemento resiliente 10 mm
4 – Camada de regularização (variável) 20 mm
5 – Laje aligeirada 240 mm
6 – Gesso projetado 18 mm

Espessura da laje = 0,335 m
Massa por unidade área= 591 Kg/m$^2$

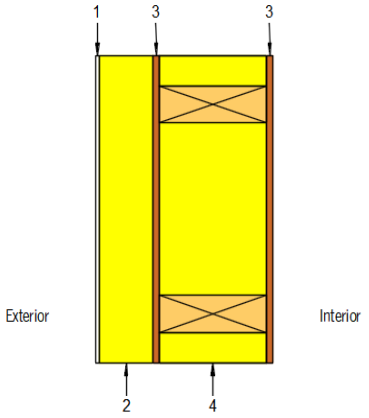
Figura 52 – Solução de laje aligeirada de separação de frações (adaptado de (Da Silva, 2009))

## 5.2 Isolamento térmico dos elementos construtivos

Os dados dos materiais foram inseridos no programa em função dos catálogos e das espessuras utilizadas. Em função dos valores submetidos o programa calcula o coeficiente de transmissão térmica para cada elemento construtivo. O cumprimento de cada elemento construtivo para a respetiva zona climática também será abordado. Após verificar em que zonas climáticas as soluções construtivas podem ser utilizadas, foi realizada uma análise relativamente à inércia térmica de um edifício com este tipo de elementos. Seguidamente, apresentam-se os resultados da simulação efetuada para cada elemento construtivo.

- Parede de Fachada

Para a parede de fachada, foram inseridos os materiais no programa, sendo apresentado na Figura 53 o resultado para o coeficiente de transmissão térmica obtido. Foi necessário determinar dois valores para o coeficiente de transmissão térmica tendo em conta o valor em zona de ponta térmica (com os barrotes) e a zona corrente (com o material de isolamento) para 1 m² de parede. Com o valor obtido foi possível verificar em que zonas climáticas a solução construtiva poderia ser aplicada. Na Tabela 16, foi analisado o cumprimento da solução construtiva da parede de fachada para as diferentes zonas climáticas.




1 – Reboco 7 mm
2 – Lã mineral (lã de rocha) 100 mm
3 – Placa OSB 12 mm
4 – Barrote de madeira com isolamento em lã de rocha 200 mm

U (corrente) = 0,11 W/(m².°C)
U (ponte térmica) = 0,20 W/(m².°C)
U (ponderado) = 0,13 W/(m².°C)

Figura 53 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica da parede de fachada

Tabela 16 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da parede de fachada (adaptado de (Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e Habitação, 2021))

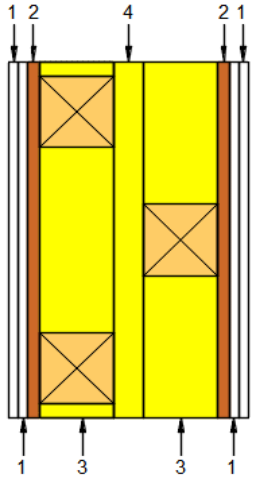
| $U_{max}$ [W/(m².°C)] | | Zona Climática | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Envolvente (zona corrente) | | Portugal Continental Região Autónoma da Madeira | | | Região Autónoma dos Açores | | |
| | | I1 | I2 | I3 | I1 | I2 | I3 |
| Condição fronteira exterior | Elementos opacos verticais | 0,50 | 0,40 | 0,35 | 1,75 | 1,60 | 1,45 |
| Verificação | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Para a parede de fachada, tendo um coeficiente de transmissão térmica de 0,13 W/(m².°C), esta solução cumpre os requisitos mínimos para todas as zonas climáticas de Portugal, seja no Continente ou nas Regiões Autónomas. O baixo coeficiente de transmissão térmica explica-se pela elevada espessura da camada de isolamento térmico e pela possibilidade desta ser incorporada entre os barrotes de madeira. A espessura de isolamento poderia ser reduzida, por exemplo utilizando uma placa de lã de rocha de 40 mm no sistema ETICS e incorporando entre os barrotes de madeira com uma placa de 40 mm, ainda cumpriria os requisitos para todas as zonas climáticas portuguesas. Por exemplo, uma parede simples

ETICS com utilização de isolamento de 80 mm de EPS (comum em Portugal) e uma parede te tijolo de 220 mm ,totalizando uma espessura de 340 mm apresenta um U de 0,34 W/(m².°C) Silvestre et al. (2022), logo a solução de parede de fachada em madeira apresenta um desempenho satisfatório comparado a uma solução tradicional em Portugal.

- **Parede Meeira**

Para a parede meeira foi realizado o mesmo procedimento de cálculo do coeficiente de transmissão térmica sendo apresentado na Figura 54 os resultados obtidos. Na Tabela 17, foi analisado o cumprimento da parede meeira para as diferentes zonas climáticas.




1 – Placa de gesso cartonado 12,5 mm
2 – Placa OSB 15 mm
3 – Estrutura de madeira, envolvida em lã mineral (lã de rocha) 100 mm
4 – Lã mineral (rocha) 40 mm

U (corrente) = 0,13 W/(m².°C)
U (ponte térmica) = 0,29 W/(m².°C)
U (ponderado) = 0,18 W/(m².°C)

Figura 54 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica da parede meeira

Tabela 17 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da parede meeira (adaptado de (Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e Habitação, 2021))

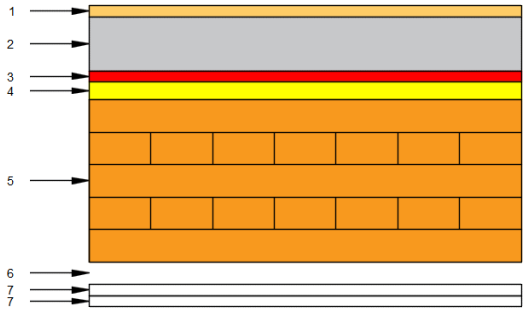
| $U_{max}$ [W/(m².°C)] | | Zona Climática | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Envolvente (zona corrente) | | Portugal Continental Região Autónoma da Madeira | | | Região Autónoma dos Açores | | |
| | | I1 | I2 | I3 | I1 | I2 | I3 |
| Condição fronteira interior com $b_{tu}$ > 0,7 | Elementos opacos verticais | 0,50 | 0,40 | 0,35 | 1,75 | 1,60 | 1,45 |
| Verificação | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Condição fronteira interior com $b_{tu}$ ≤ 0,7 | Elementos opacos verticais | 2,00 | 2,00 | 1,90 | 2,00 | 2,00 | 1,90 |
| Verificação | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Na solução construtiva da parede meeira foi verificado o cumprimento dos requisitos da parede para todas as zonas climáticas tanto em Portugal Continental, como para as Regiões Autónomas. Tal como

no caso da parede de fachada a possibilidade de isolamento dos barrotes de madeira com lã de rocha beneficia o isolamento térmico. Mesmo retirando a lã de rocha da caixa de ar a parede continuaria a cumprir o regulamento para todas as zonas climáticas. Um exemplo de parede com um U de 0,29 W/(m².°C) é uma parede dupla de blocos de gesso com 270 mm, com a caixa de ar de 110 mm preenchida parcialmente com placas de lã de rocha com 40 kg/m³ e 50 mm de espessura, sendo a parede revestida num dos lados com camada delgada de gesso e, no outro lado, com camada de 5 mm de um produto enchimento e um produto de acabamento (Laboratório Nacional de Engenharia Civil(LNEC) et al., 2014).

- **Laje de Separação de Frações**

Por último, na Figura 55 encontra-se representado o cálculo do coeficiente de transmissão térmica para a solução construtiva para a laje de separação de frações. Na Tabela 18, foi verificado o cumprimento dos requisitos térmicos para as diferentes zonas climáticas. Para a condutibilidade térmica do material resiliente foi tomado o valor referente a borracha e para a lã de vidro foi utilizado o valor para a lã de vidro com 15-100 Kg/m³, estando ambos os valores presentes no ITE-50 (Dos Santos et al., 2006).




1 – Placa de pinho 13 mm
2 – Betonilha 60 mm
3 – Piso resiliente 12 mm
4 – Lã de vidro 20 mm
5 – Painel CLT 180 mm
6 – Caixa de ar 25 mm
7 – Placa de gesso cartonado 12,5 mm

**Laje de teto**
Coeficiente de transmissão térmica (arrefecimento) = 0,37 W/(m².°C)
Coeficiente de transmissão térmica (aquecimento) = 0,39 W/(m².°C)

**Laje de piso**
Coeficiente de transmissão térmica (arrefecimento) = 0,39 W/(m².°C)
Coeficiente de transmissão térmica (aquecimento) = 0,37 W/(m².°C)

**Laje de piso em contacto com o exterior**
Coeficiente de transmissão térmica (arrefecimento) = 0,39 W/(m².°C)
Coeficiente de transmissão térmica (aquecimento) = 0,38 W/(m².°C)

Figura 55 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica da laje de separação de frações

Para laje de separação entre pisos o cumprimento do valor do coeficiente de transmissão térmica deu-se para todas as zonas climáticas na condição fronteira menos severa. Já para as zonas climáticas mais severas com $b_{ztu} > 0,7$, nas Regiões Autónomas o valor é cumprido para as zonas I1, I2 e I3. No que toca a Portugal Continental apenas são cumpridos os requisitos para a zona I1. Seria necessário o aumento da espessura de isolamento de lã de vidro para 40 mm para que pudessem ser cumpridos os valores para as restantes zonas climáticas. Comparando com um exemplo de lajes convencionais em Portugal, uma laje maciça em betão armado com 200 mm, 40 mm de camada de regularização, lâmina de lã de rocha com 20 mm, lajeta de betão armado com 40 mm e revestimento de piso em madeira com 8 mm e rebocada na superfície inferior apresenta um U de 1,11 W/(m².°C) (LNEC et al., 2014). Aqui também as lajes de madeira acabam por apresentar um U mais baixo comparando a uma laje de betão, no entanto, a laje de betão não apresenta teto falso, o que iria melhorar a sua prestação.

Tabela 18 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da laje de separação de frações (Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e Habitação, 2021))

| **$U_{max}$ [W/(m².°C)]** | | **Zona Climática** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Envolvente (zona corrente)** | | **Portugal Continental Região Autónoma da Madeira** | | | **Regiões Autónoma dos Açores** | | |
| | | **I1** | **I2** | **I3** | **I1** | **I2** | **I3** |
| Condição fronteira exterior ou interior com $b_{ztu} > 0,7$ | Elementos opacos horizontais | 0,40 | 0,35 | 0,30 | 1,25 | 1,00 | 0,90 |
| Verificação | | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Condição fronteira exterior ou interior com $b_{ztu} \leq 0,7$ | Elementos opacos horizontais | 1,65 | 1,30 | 1,20 | 1,65 | 1,30 | 1,20 |
| Verificação | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Relativamente à inércia térmica, segundo o Manual SCE as soluções construtivas apresentam características que as torna suscetíveis de darem uma inércia fraca ao edifício, sendo de destacar os três seguintes pontos (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021):

- Teto falso em todas as divisões ou pavimento de madeira ou esteira leve (cobertura);
- Revestimento de piso tipo flutuante ou pavimento de madeira;
- Paredes de compartimentação em tabique ou gesso cartonado ou sem paredes de compartimentação.

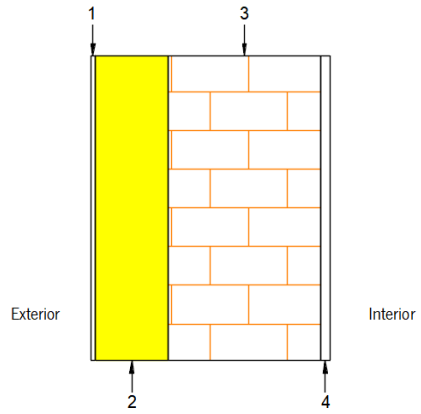
A inércia fraca das soluções construtivas analisadas neste estudo pode trazer problemas no caso do clima mediterrâneo a longo prazo. Em Itália, um país com tradição em construções de madeira, Tonelli et al. (2014) referem que, no verão, as estruturas leves em madeira se comportam de forma inadequada,

não conseguindo dissipar o calor acumulado. O aumento da massa estrutural é sugerido por parte dos autores do estudo. Outra forma de aumentar a dissipação do calor é aumentar a área envidraçada do edifício, promovendo maior ventilação dos seus compartimentos.

### Análise desempenho térmico – Soluções em alvenaria

- **Parede de Fachada**

Para a parede de fachada em alvenaria também foi calculado o coeficiente de transmissão térmica com os dados dos materiais presentes no ITE-50 (Dos Santos et al., 2006). A Figura 56 apresenta o valor do coeficiente de transmissão térmica da parede de fachada. Na Tabela 19 foi analisado o cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da parede de fachada.




1 – Argamassa de reboco 7 mm
2 – Lã de Rocha 120 mm
3 – Alvenaria de tijolo 250 mm
4 – Reboco 15 mm

U = 0,27 W/(m².°C)

Figura 56 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica da parede de fachada em alvenaria

Tabela 19 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da parede de fachada em alvenaria (Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e Habitação, 2021))

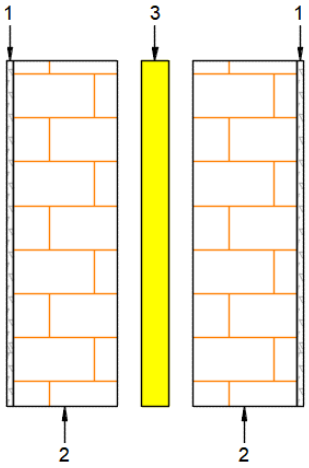
| $U_{max}$ [W/(m².°C)] | | Zona Climática | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Envolvente (zona corrente) | | Portugal Continental Região Autónoma da Madeira | | | Região Autónoma dos Açores | | |
| | | I1 | I2 | I3 | I1 | I2 | I3 |
| Condição fronteira exterior | Elementos opacos verticais | 0,50 | 0,40 | 0,35 | 1,75 | 1,60 | 1,45 |
| Verificação | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Para a parede de fachada em alvenaria, foi obtido o U de 0,27 W/(m².°C), esta solução cumpre os requisitos mínimos para todas as zonas climáticas de Portugal, seja no Continente ou nas Regiões Autónomas, tal como já acontecia para a solução de parede madeira. Reduzindo a espessura para os 80 mm da lã de rocha apenas não cumpriria para zona I3 de Portugal Continental e Região Autónoma da Madeira. Comparando ambas as soluções, a solução em madeira apresenta um coeficiente de

transmissão de transmissão térmica mais baixo apesar da parede apresentar menor espessura que a solução em alvenaria.

- **Parede Meeira**

Para a parede meeira ou interior em alvenaria de tijolo também foi calculado o coeficiente de transmissão térmica com os dados dos materiais presentes no ITE-50 (Dos Santos et al., 2006). A Figura 57 apresenta o valor do coeficiente de transmissão térmica da parede de fachada. Na Tabela 20 foi analisado o cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da parede dupla meeira




1 – Argamassa de reboco 10 mm
2 – Alvenaria de tijolo 150 mm
3 – Caixa de ar de 110 mm preenchida com lã de rocha 40 mm
4 – Lã de rocha 40 mm

U = 0,41 W/(m².°C)

Figura 57 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica da parede meeira ou interior em alvenaria

Tabela 20 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da parede meeira ou interior (adaptado de (Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e Habitação, 2021))

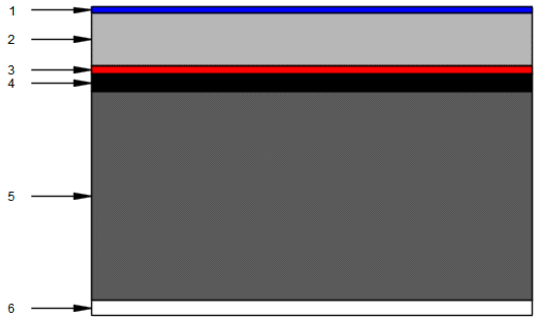
| $U_{max}$ [W/(m².°C)] | | Zona Climática | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Envolvente (zona corrente) | | Portugal Continental Região Autónoma da Madeira | | | Região Autónoma dos Açores | | |
| | | I1 | I2 | I3 | I1 | I2 | I3 |
| Condição fronteira interior com $b_{tu}$ > 0,7 | Elementos opacos verticais | 0,50 | 0,40 | 0,35 | 1,75 | 1,60 | 1,45 |
| Verificação | | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Condição fronteira interior com $b_{tu}$ ≤ 0,7 | Elementos opacos verticais | 2,00 | 2,00 | 1,90 | 2,00 | 2,00 | 1,90 |
| Verificação | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Para a parede meeira ou interior em alvenaria não se verifica o cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico nas zonas climáticas I2 e I3 em Portugal Continental e na Região Autónoma da Madeira, sendo necessário o aumento da espessura da camada de isolamento de lã de rocha.

Comparando com a solução em madeira esta tem um coeficiente de transmissão térmica mais elevado, apesar de ter uma espessura superior. A possibilidade de isolamento dos barrotes de madeira, mais uma vez, permitiu à solução de parede meeira em madeira obter um coeficiente de transmissão térmica mais baixo.

- Laje de Separação de Frações

Por último, na Figura 58 encontra-se representado o cálculo do coeficiente de transmissão térmica para a solução construtiva para a laje aligeirada de separação de frações, usando também os valores das condutibilidades térmicas presentes no ITE-50 (Dos Santos et al., 2006) e o valor da betonilha para a camada de regularização presente no Anexo 10. Na Tabela 21 foi verificado o cumprimento dos requisitos térmicos para as diferentes zonas climáticas.




1 – Revestimento cerâmico ou pétreo 7 mm
2 – Lajeta de betão armado 60 mm
3 – Elemento resiliente 10 mm
4 – Camada de regularização (variável) 20 mm
5 – Laje aligeirada 240 mm
6 – Gesso projetado 18 mm

**Laje de teto**

Coeficiente de transmissão térmica (arrefecimento) = 1,14 W/(m$^2$.°C)
Coeficiente de transmissão térmica (aquecimento) = 1,36 W/(m$^2$.°C)

**Laje de piso**

Coeficiente de transmissão térmica (arrefecimento) = 1,36 W/(m$^2$.°C)
Coeficiente de transmissão térmica (aquecimento) = 1,14 W/(m$^2$.°C)

**Laje de piso em contacto com o exterior**

Coeficiente de transmissão térmica (arrefecimento) = 1,48 W/(m$^2$.°C)
Coeficiente de transmissão térmica (aquecimento) = 1,34 W/(m$^2$.°C)

Figura 58 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica da laje de separação de frações aligeirada

Tabela 21 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho térmico da laje de separação de frações (Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e Habitação, 2021))

| $U_{max}$ [W/(m².°C)] | | Zona Climática | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Envolvente (zona corrente) | | Portugal Continental Região Autónoma da Madeira | | | Regiões Autónoma dos Açores | | |
| | | I1 | I2 | I3 | I1 | I2 | I3 |
| Condição fronteira exterior ou interior com $b_{tu} > 0,7$ | Elementos opacos horizontais | 0,40 | 0,35 | 0,30 | 1,25 | 1,00 | 0,90 |
| Verificação | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ |
| Condição fronteira exterior ou interior com $b_{tu} \leq 0,7$ | Elementos opacos horizontais | 1,65 | 1,30 | 1,20 | 1,65 | 1,30 | 1,20 |
| Verificação | | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ |

Para a laje de separação de frações, o facto de não ser usada uma camada de isolamento térmico influenciou o seu desempenho, cumprindo apenas os requisitos para a zona climática I1. Neste caso, também a laje de separação de frações em madeira apresentou melhores resultados, com a mesma espessura. No entanto, tal é resultado da utilização de camada de isolamento térmico na laje de madeira.

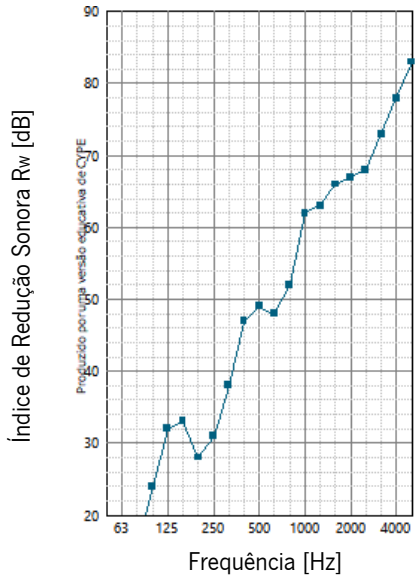
## 5.3 Isolamento acústico dos elementos construtivos

Para o estudo do isolamento acústico dos elementos construtivos foram tidos em conta os resultados dos ensaios laboratoriais de cada um dos elementos construtivos. Os resultados dos ensais dos diferentes elementos construtivos foram inseridos no programa *Acoubat CYPE Ingenieros (2024a), sendo* apresentado o gráfico relativo ao índice de redução sonora para as paredes e laje. Na laje, também será apresentado o gráfico relativo ao índice de isolamento sonoro a sons de percussão.

- **Parede de Fachada**

Em paredes de fachada frequentemente nos elementos envidraçados torna-se importante a utilização de janelas com vidro duplo e com uma boa vedação para limitar a propagação sonora para o interior do edifício através das frinchas. Também é importante destacar que a melhoria no isolamento sonoro com dois painéis de vidro é bastante dependente da massa dos vidros e também e do espaço entre eles. Quanto maiores forem estes dois valores (dentro dos valores da construção civil), melhor o isolamento sonoro em questão (Patrício, 2018). O ensaio realizado para o estudo da parede de fachada ETICS em

madeira descrita na secção 5.1, foi em laboratório segundo a norma ISO 10140-2:2021[6] (CEN 2021), sendo também utilizada a norma ISO 717-1:2020[7] (CEN 2020) para a classificação do isolamento sonoro a sons aéreos. O gráfico correspondente ao índice de atenuação sonora ($R_w$) da parede de fachada estudada encontra-se representado na Figura 59.




| Freq. | R.labo |
|---|---|
| 50 | 14.0 |
| 63 | 15.0 |
| 80 | 14.0 |
| 100 | 24.0 |
| 125 | 32.0 |
| 160 | 33.0 |
| 200 | 28.0 |
| 250 | 31.0 |
| 315 | 38.0 |
| 400 | 47.0 |
| 500 | 49.0 |
| 630 | 48.0 |
| 800 | 52.0 |
| 1000 | 62.0 |
| 1250 | 63.0 |
| 1600 | 66.0 |
| 2000 | 67.0 |
| 2500 | 68.0 |
| 3150 | 73.0 |
| 4000 | 78.0 |
| 5000 | 83.0 |
| Hz | dB |

$R_w$ (C; $C_{tr}$; C50-3150;$C_{tr}$50-3150) = 47 (-3; 8 ;-5 ;-16) dB

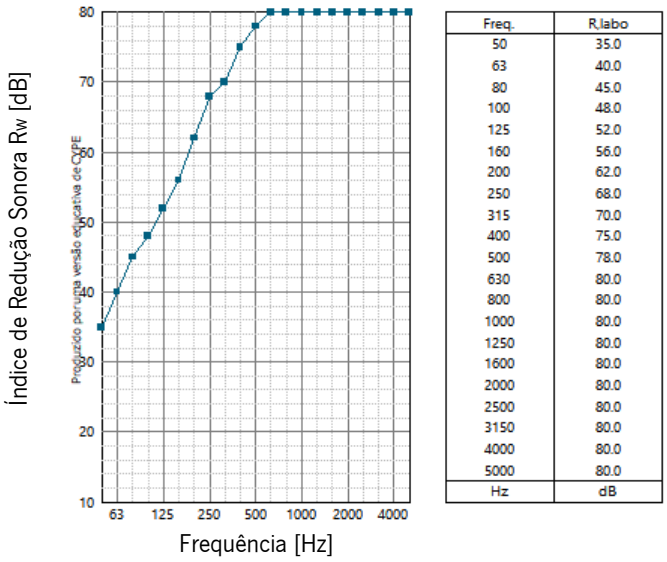
Figura 59 – Índice de redução sonora associado à parede de fachada (adaptado de (Nusser et al., 2020; *CYPE Ingenieros*, 2024a))

- **Parede Meeira**

A solução de parede meeira considerada foi a descrita em 5.1, estudada por Muellner et al. (2008), tendo sido os valores do $R_w$, os considerados os do gráfico apresentado no seu estudo, em que foram consideradas camadas com e elevada massa e, se de acordo com a construção, um sistema de ressonância múltipla fosse evitado. A parede meeira foi ensaiada em laboratório de acordo a norma ISO 10140-2:2021 (CEN 2021). Na Figura 60, apresenta-se o índice de atenuação sonora ($R_w$) da parede meeira.

[6] A Norma ISO 10140-2:2021 específica um método laboratorial para medir o isolamento a sons aéreos de elementos construtivos, tais como, paredes, pavimentos, portas, janelas, portadas, elementos de fachada, fachadas, vidros, pequenos elementos técnicos, como dispositivos de transferência de ar, painéis de ventilação, entradas de ar exterior, condutas elétricas, sistemas de vedação de trânsito e combinações de elementos, por exemplo paredes ou pavimentos com forros, tetos falsos ou pavimento flutuantes.

[7] A Norma ISO 717-1:2020 define grandezas numéricas para o isolamento a sons aéreos, em edifícios e elementos construtivos, como paredes, pavimentos, portas e janelas; tem em conta os diferentes espectros de nível sonoro de várias fontes de ruído, como ruído dentro do edifício e tráfego fora do edifício e fornece regras para determinar estas quantidades a partir dos resultados de medições realizadas em bandas de um terço de oitava ou de oitava, por exemplo, de acordo com a ISO 10140-2 e a ISO 16283-1.




| Freq. | R,labo |
|---|---|
| 50 | 35.0 |
| 63 | 40.0 |
| 80 | 45.0 |
| 100 | 48.0 |
| 125 | 52.0 |
| 160 | 56.0 |
| 200 | 62.0 |
| 250 | 68.0 |
| 315 | 70.0 |
| 400 | 75.0 |
| 500 | 78.0 |
| 630 | 80.0 |
| 800 | 80.0 |
| 1000 | 80.0 |
| 1250 | 80.0 |
| 1600 | 80.0 |
| 2000 | 80.0 |
| 2500 | 80.0 |
| 3150 | 80.0 |
| 4000 | 80.0 |
| 5000 | 80.0 |
| Hz | dB |

$R_w$ (C; $C_{tr}$; C50-3150; $C_{tr}$,50-3150) = 76 (-4; -11; -7; -19) dB

Nota: Foi considerado o valor de 80 dB a partir de frequência de 630 Hz, visto não ser visível o restante do gráfico no estudo de Muellner, Frey & Humer (2008) e este ser o valor mínimo do Rw que a solução apresenta.

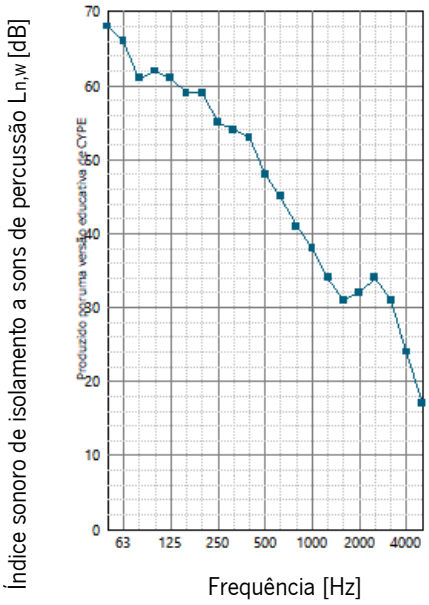
Figura 60 – Índice de redução sonora associado à parede meeira (adaptado de (Muellner et al., 2008; *CYPE Ingenieros,* 2024a))

- **Laje de Separação de Frações**

Para a solução desenvolvida por Vardaxis et al. (2022), descrita em 5.1, são apresentados os valores referentes ao índice de redução sonora a sons aéreos e ao índice de isolamento sonoro a sons de percussão (Figuras 61 e 62). Para sons de percussão o ensaio foi realizado em laboratório segundo a norma ISO 10140-3:2021[8] (CEN 2021) e segundo a norma ISO 717-2:2020[9] (CEN2020), para a classificação do isolamento sonoro a sons de percussão. Relativamente a sons aéreos o ensaio foi também realizado em laboratório segundo a norma ISO 10140-2:2021 (CEN 2021), sendo também utilizada a norma ISO 717-1:2020 (CEN 2020) para a classificação do isolamento sonoro a sons aéreos.

[8] A Norma ISO 10140-3:2021 especifica os métodos laboratoriais para medir o isolamento sonora a sons de percussão de pavimentos. Os resultados dos ensaios podem ser utilizados para comparar propriedades de isolamento acústico dos elementos construtivos, classificar os elementos de acordo com o seu isolamento acústico, ajudar a conceber produtos que requere determinadas propriedades acústicas e estimar desempenho acústico in situ em edifícios. As medições são efetuadas em laboratório onde as transmissões marginais são suprimidas, não sendo as medições aplicáveis diretamente à situação de campo.

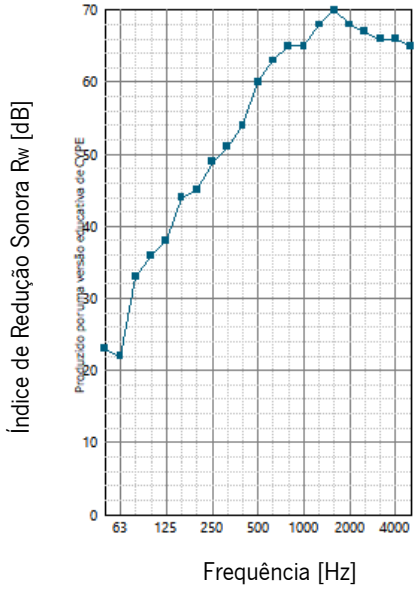
[9] A Norma ISO 717-2:2020 define grandezas numéricas para isolamento sonoro a sons de percussão em edifícios e pavimentos; fornece as regras para determinar as grandezas a partir dos resultados das medições realizadas em bandas de um terço de oitava de acordo com ISO 10140-3 e ISO 16283-2, e em bandas de oitava de acordo com esta opção na ISO 16283-2 para apenas medições de campo; define grandezas numéricas para a redução do ruído de impacto dos revestimentos de pavimentos e pavimentos flutuantes, calculadas a partir dos resultados das medições realizadas de acordo com a ISO 10140-3 e especifica um procedimento para avaliar a redução ponderada do nível de pressão sonora de impacto por revestimentos de pavimentos leves.




| Freq. | Ln,labo |
|---|---|
| 50 | 68.0 |
| 63 | 66.0 |
| 80 | 61.0 |
| 100 | 62.0 |
| 125 | 61.0 |
| 160 | 59.0 |
| 200 | 59.0 |
| 250 | 55.0 |
| 315 | 54.0 |
| 400 | 53.0 |
| 500 | 48.0 |
| 630 | 45.0 |
| 800 | 41.0 |
| 1000 | 38.0 |
| 1250 | 34.0 |
| 1600 | 31.0 |
| 2000 | 32.0 |
| 2500 | 34.0 |
| 3150 | 31.0 |
| 4000 | 24.0 |
| 5000 | 17.0 |
| Hz | dB |

$L_{n,w}$ (CI; CI, C50-2500) = 52 ( 0; 5) dB

Figura 61 – Índice de isolamento a sons de percussão da laje de separação de frações (adaptado de (Vardaxis et al., 2022; *CYPE Ingenieros*, 2024a))




| Freq. | R,labo |
|---|---|
| 50 | 23.0 |
| 63 | 22.0 |
| 80 | 33.0 |
| 100 | 36.0 |
| 125 | 38.0 |
| 160 | 44.0 |
| 200 | 45.0 |
| 250 | 49.0 |
| 315 | 51.0 |
| 400 | 54.0 |
| 500 | 60.0 |
| 630 | 63.0 |
| 800 | 65.0 |
| 1000 | 65.0 |
| 1250 | 68.0 |
| 1600 | 70.0 |
| 2000 | 68.0 |
| 2500 | 67.0 |
| 3150 | 66.0 |
| 4000 | 66.0 |
| 5000 | 65.0 |
| Hz | dB |

$R_w$ (C; $C_{tr}$; C50-3150; $C_{tr}$,50-3150) = 59 (-2; -7; -5; -17) dB

Figura 62 – Índice de redução sonora da laje de separação de frações (adaptado de (Vardaxis et al., 2022; *CYPE Ingenieros (2024a)*))

### 5.3.1 Análise do desempenho acústico das soluções construtivas aplicadas ao edifício tipo

Tendo os valores dos ensaios para as diferentes soluções e visando o cumprimento dos requisitos do RRAE para o isolamento a sons de condução aérea e de percussão, foram incorporadas as soluções construtivas no programa Acoubat (*CYPE Ingenieros, 2024a*). A simulação foi realizada tendo em conta os dois edifícios adjacentes. Foram estudados 4 compartimentos, sendo os apartamentos 1 de cada

edifício adjacentes (quarto 1 para o edifício 1 e quarto 2 para edifício 2) relativamente ao piso 1 e os apartamentos 2 (quarto 3 para o edifício 1 e quarto 4 para edifício 2) de cada edifício adjacentes relativamente ao piso 2, tendo todos eles as mesmas dimensões e a mesma configuração e com a função de quarto 2 como indicado na Figura 45. A Figura 63 apresenta a configuração dos quartos alvo de análise.

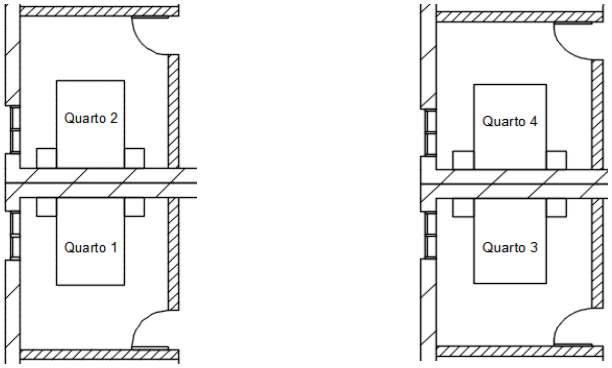



Figura 63 – Compartimentos em estudo piso 1/ piso 2

Inicialmente foram retiradas as áreas e alturas de todos os elementos construtivos e também do pé direito livre para cada um dos quartos. A Tabela 22 apresenta o volume dos compartimentos, a altura e áreas dos diferentes elementos construtivos.

Tabela 22 – Áreas e alturas para o compartimento em estudo

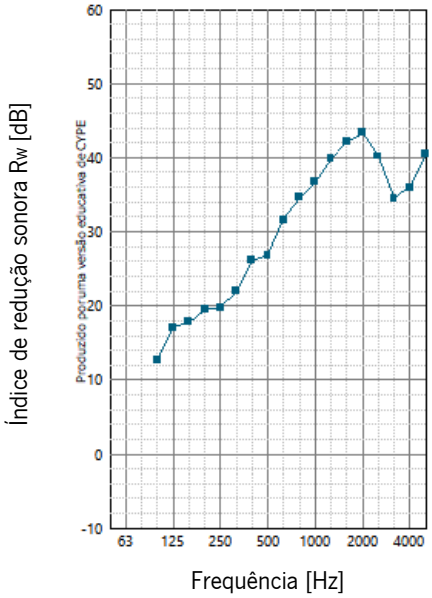
| Elemento Construtivos | Volume ($m^3$) | Altura (m) | Área ($m^2$) |
|---|---|---|---|
| Volume compartimento | 26,26 | - | - |
| Pé direito | - | 2,90 | - |
| Pé direito livre | - | 2,60 | - |
| Janela | - | - | 2,60 |
| Porta | - | - | 1,65 |
| Parede de Fachada | - | - | 8,30 |
| Parede Meeira | - | - | 10,30 |
| Laje de separação de frações | - | - | 10,10 |
| Parede divisória interior | - | - | 14,85 |

Os dados foram inseridos para cada um dos quatro compartimentos em estudo. De sublinhar que além das soluções construtivas inseridas no programa, foram também inseridos elementos pertencentes à base de dados do *Acoubat CYPE Ingenieros (2024a)* das quais se destacam:

- A parede divisória simples que separa os quartos das restantes divisões do apartamento constituída por estrutura de madeira (66/48) com uma placa de OSB de 9 mm de ambos os lados com um índice de redução sonora de 32 dB e massa por unidade de área de 25 Kg/$m^2$;
- A porta de entrada para o quarto em madeira com uma folha e um índice de redução sonora de 40 dB e massa por unidade de área de 25 Kg/$m^2$;

- A janela em policloreto de vinilo (PVC) com vidro duplo 4 (16) 6 mm e índice de redução sonora de 36 dB e massa por unidade de área de 25 Kg/m$^2$, com caixa de estores em PVC que tem um índice de isolamento normalizado ($D_{n,e,w}$) de 52 dB e com 1 m de comprimento.

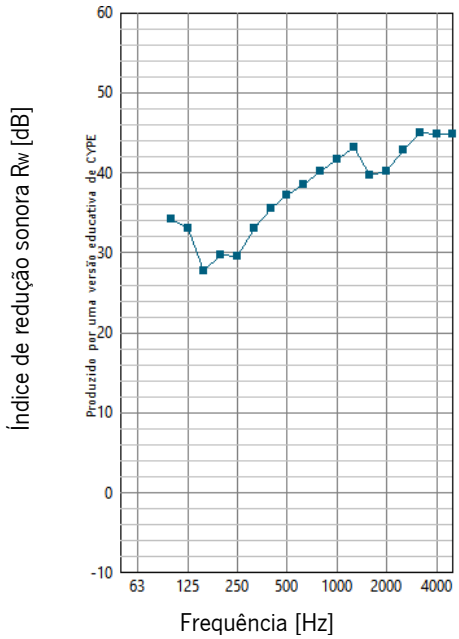
Nas Figuras 64, 65, 66 e 67 estão representados os gráficos relativos às soluções construtivas para a parede divisória, porta, janela e caixa de estores.




| Freq. | R,labo |
|---|---|
| 50 | - |
| 63 | - |
| 80 | - |
| 100 | 12.7 |
| 125 | 17.1 |
| 160 | 17.8 |
| 200 | 19.5 |
| 250 | 19.8 |
| 315 | 22.0 |
| 400 | 26.1 |
| 500 | 26.8 |
| 630 | 31.6 |
| 800 | 34.6 |
| 1000 | 36.7 |
| 1250 | 39.8 |
| 1600 | 42.1 |
| 2000 | 43.4 |
| 2500 | 40.2 |
| 3150 | 34.5 |
| 4000 | 36.0 |
| 5000 | 40.5 |
| Hz | dB |

$R_w$ (C; $C_{tr}$) = 32 (-2; -6) dB

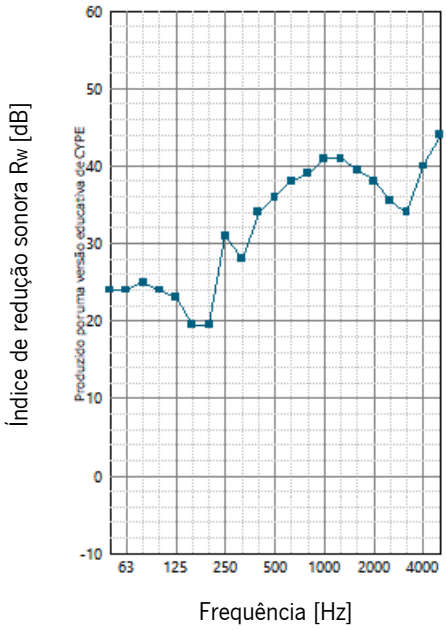
Figura 64 – Índice de redução sonora da parede divisória (adaptado de (*CYPE Ingenieros, 2024a*))




| Freq. | R,labo |
|---|---|
| 50 | - |
| 63 | - |
| 80 | - |
| 100 | 34.2 |
| 125 | 33.1 |
| 160 | 27.8 |
| 200 | 29.7 |
| 250 | 29.5 |
| 315 | 33.0 |
| 400 | 35.6 |
| 500 | 37.2 |
| 630 | 38.6 |
| 800 | 40.2 |
| 1000 | 41.7 |
| 1250 | 43.2 |
| 1600 | 39.7 |
| 2000 | 40.2 |
| 2500 | 42.8 |
| 3150 | 45.0 |
| 4000 | 44.8 |
| 5000 | 44.9 |
| Hz | dB |

$R_w$ (C; $C_{tr}$) = 40 (-1; -3) dB

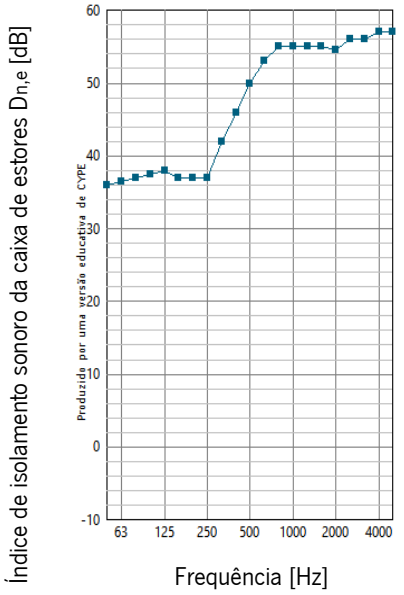
Figura 65 – Índice de redução sonora da porta (adaptado de *(CYPE Ingenieros 2024a)*)




| Freq. | R,labo |
|---|---|
| 50 | 24.0 |
| 63 | 24.0 |
| 80 | 25.0 |
| 100 | 24.0 |
| 125 | 23.0 |
| 160 | 19.5 |
| 200 | 19.5 |
| 250 | 31.0 |
| 315 | 28.0 |
| 400 | 34.0 |
| 500 | 36.0 |
| 630 | 38.0 |
| 800 | 39.0 |
| 1000 | 41.0 |
| 1250 | 41.0 |
| 1600 | 39.5 |
| 2000 | 38.0 |
| 2500 | 35.5 |
| 3150 | 34.0 |
| 4000 | 40.0 |
| 5000 | 44.0 |
| Hz | dB |

$R_w$ (C; $C_{tr}$;C50-3150;$C_{tr}$,50-3150) = 36
(-2; -5; -2; -5) dB

Figura 66 – Índice de redução sonora da janela (adaptado de *(CYPE Ingenieros 2024a)*)




| Freq. | Dne |
|---|---|
| 50 | 36.0 |
| 63 | 36.5 |
| 80 | 37.0 |
| 100 | 37.5 |
| 125 | 38.0 |
| 160 | 37.0 |
| 200 | 37.0 |
| 250 | 37.0 |
| 315 | 42.0 |
| 400 | 46.0 |
| 500 | 50.0 |
| 630 | 53.0 |
| 800 | 55.0 |
| 1000 | 55.0 |
| 1250 | 55.0 |
| 1600 | 55.0 |
| 2000 | 54.5 |
| 2500 | 56.0 |
| 3150 | 56.0 |
| 4000 | 57.0 |
| 5000 | 57.0 |
| Hz | dB |

$D_{n,e,\,w}$ (C; $C_{tr}$;C50-3150;$C_{tr}$,50-3150) = 52
(-2; -6; -2; -7) dB

Figura 67 – Índice de isolamento normalizado da caixa de estores (adaptado de *(CYPE Ingenieros 2024a)*)

Após todos os elementos estarem incorporados nos quartos dos respetivos apartamentos e serem contabilizadas as transmissões marginais entre eles, foram obtidos os valores de $D_{2m,nT,W}$, $D_{nT,W}$ e $L'_{nT,W}$. Nas Tabelas 23, 24, 25 e 26 encontra-se a respetiva verificação regulamentar para as diferentes soluções construtivas baseado nos valores obtidos no *Acoubat (CYPE Ingenieros, 2024a)*.

Tabela 23 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho acústico da parede de fachada (adaptado de (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008))

| **Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea, $D_{2m,nT,w}$ Entre o exterior (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (receção)** | **Valor regulamentar (dB)** | **$D_{2m,nT,w}$ obtido (dB)** | **Verificação** |
|---|---|---|---|
| Zonas Sensíveis | ≥ 28 | 40 | ✓ |
| Zonas Mistas | ≥ 33 | | |

Tabela 24 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho acústico da parede meeira ou interior (adaptado de (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008))

| **Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea, $D_{nT,w}$ Entre o espaço abaixo indicado (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (receção)** | **Valor Regulamentar (dB)** | **$D_{nT,w}$ obtido (dB)** | **Verificação** |
|---|---|---|---|
| Compartimentos de um fogo | ≥ 50 | 72 | ✓ |
| Locais de circulação do edifício | ≥ 48 | | |
| Garagem de parqueamento | ≥ 50 | | |
| Caminho de circulação automóvel (edifício com elevadores) | ≥ 40 | | |
| Locais de comércio, indústria, serviços ou diversão | ≥ 58 | | |

Tabela 25 – Verificação dos requisitos mínimos de desempenho acústico da laje de separação de frações, sons de percussão (adaptado de (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008))

| **Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Percussão, $L'_{nT,w}$ Entre o espaço/situação abaixo indicada (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (receção)** | **Valor Regulamentar (dB)** | **$L'_{nT,w}$ obtido (dB)** | **Verificação** |
|---|---|---|---|
| Pavimentos de outros fogos ou locais de circulação comum (excetuando se o local emissor for um caminho de circulação vertical, em edifício servido por ascensores) | ≤ 60 | 53 | ✓ |
| Locais de comércio, indústria, serviços ou diversão | ≤ 50 | | ✗ |

Tabela 26 – Verificação dos requisitos mínimos de desempenho acústico da laje de separação de frações, sons aéreos (adaptado de (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008))

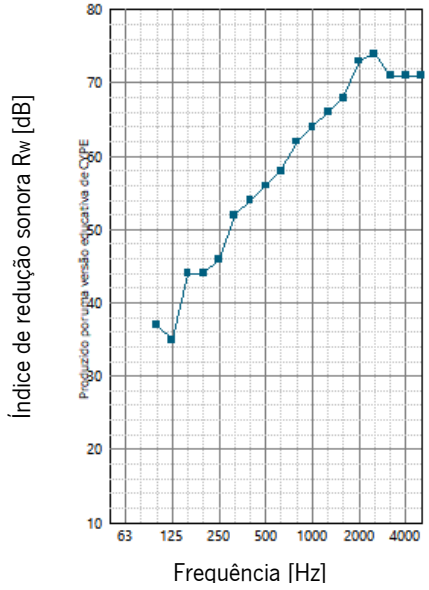
| **Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea, $D_{nT,w}$ Entre o espaço abaixo indicado (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (receção)** | **Valor Regulamentar (dB)** | **$D_{nT,w}$ obtido (dB)** | **Verificação** |
|---|---|---|---|
| Compartimentos de um fogo | ≥ 50 | 55 | ✓ |
| Locais de circulação do edifício | ≥ 48 | | |
| Garagem de parqueamento | ≥ 50 | | |
| Caminho de circulação automóvel (edifício com elevadores) | ≥ 40 | | |
| Locais de comércio, indústria, serviços ou diversão | ≥ 58 | | ✗ |

As soluções construtivas de paredes e laje em madeira (leves) cumpriram todos os requisitos no que diz respeito ao isolamento sonoro a sons aéreos entre frações de habitação e entre habitações e zonas de circulação. O único requisito que não foi cumprido foi relativo ao isolamento a sons aéreos e de percussão da laje caso esta fosse incorporada em locais de comércio, indústria, serviços ou diversão.

### Análise desempenho acústico – Soluções em alvenaria

- **Parede de Fachada**

O ensaio da parede de fachada em alvenaria em ETICS (Figura 50) foi realizado segundo a norma ISO 10140-2:2021 (CEN 2021) relativamente a sons aéreos e a norma ISO 717-1:2020 (CEN 2020) para a sua classificação. Na Figura 68, é apresentado o gráfico com o índice de redução sonora para a parede de fachada.




| Freq. | R,labo |
|---|---|
| 50 | - |
| 63 | - |
| 80 | - |
| 100 | 37.0 |
| 125 | 35.0 |
| 160 | 44.0 |
| 200 | 44.0 |
| 250 | 46.0 |
| 315 | 52.0 |
| 400 | 54.0 |
| 500 | 56.0 |
| 630 | 58.0 |
| 800 | 62.0 |
| 1000 | 64.0 |
| 1250 | 66.0 |
| 1600 | 68.0 |
| 2000 | 73.0 |
| 2500 | 74.0 |
| 3150 | 71.0 |
| 4000 | 71.0 |
| 5000 | 71.0 |
| Hz | dB |

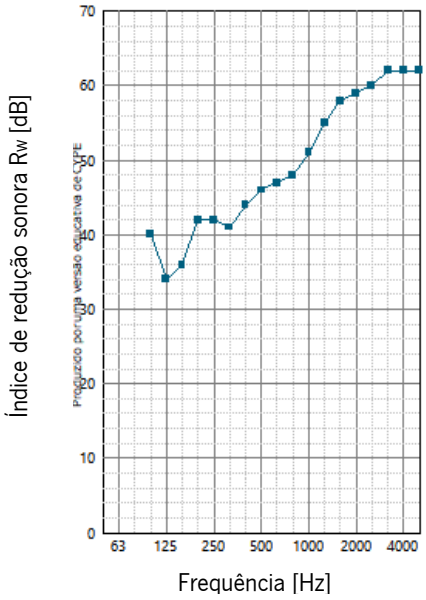
Rw (C; Ctr) = 58 (-2;-7) dB

Nota: Os valores de referência para a norma ISO 10140-2:2021 localizam-se entre 100-3150 para a banda de 1/3 oitava, para as frequências 4000 Hz e 5000 Hz foi considerado o mesmo valor da frequência de 3150 Hz, porque não estavam disponíveis no trabalho de Scamoni, Scrosati, Depalma et al. (2021), de modo a não afetar a visibilidade do gráfico.

Figura 68 – Índice de redução sonora da parede de fachada em alvenaria (adaptado de (Scamoni, Scrosati, Depalma et al. 2021; *CYPE Ingenieros 2024a*))

- **Parede Meeira**

O ensaio da parede meeira ou interior em alvenaria (Figura 51) foi realizado em laboratório segundo a norma ISO 10140-2:2021 (CEN 2021). Na Figura 69, é apresentado o gráfico referente ao seu índice de redução sonora.




| Freq. | R,labo |
|---|---|
| 50 | - |
| 63 | - |
| 80 | - |
| 100 | 40.0 |
| 125 | 34.0 |
| 160 | 36.0 |
| 200 | 42.0 |
| 250 | 42.0 |
| 315 | 41.0 |
| 400 | 44.0 |
| 500 | 46.0 |
| 630 | 47.0 |
| 800 | 48.0 |
| 1000 | 51.0 |
| 1250 | 55.0 |
| 1600 | 58.0 |
| 2000 | 59.0 |
| 2500 | 60.0 |
| 3150 | 62.0 |
| 4000 | 62.0 |
| 5000 | 62.0 |
| Hz | dB |

Rw (C; Ctr) = 50 (-1;-4) dB

Nota: Os valores de referência para a norma ISO 10140-2:2021 localizam-se entre 100-3150 para a banda de 1/3 oitava, para as frequências 4000 Hz e 5000 Hz foram inseridos com o mesmo valor da frequência de 3150 Hz de modo a não prejudicar a visibilidade do gráfico.

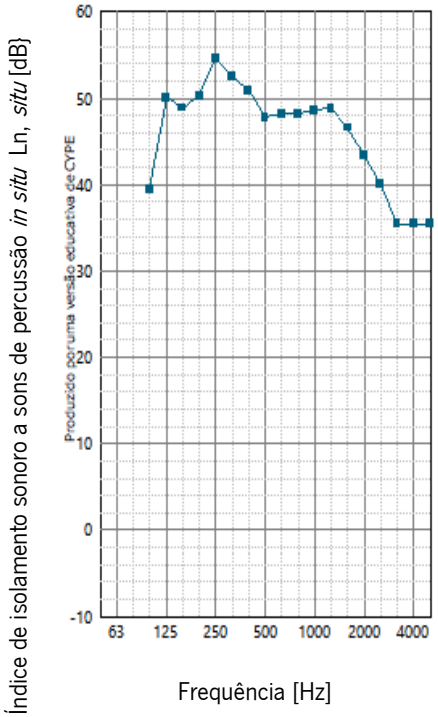
Figura 69 – Índice de redução sonora da parede de meeira em alvenaria (adaptado de (Imperalum, sem data; *CYPE Ingenieros 2024a)*)

Na Figura 70, é apresentado o gráfico relativo ao índice de isolamento sonoro a sons de percussão da solução construtiva da laje aligeirada de separação de frações (Figura 52), medido *in situ* segundo a norma ISO 16283-2:2020[10] (CEN 2020) para sons de percussão. Na Figura 71, é apresentado o gráfico relativo ao isolamento a sons de condução aérea, medidos também *in situ* segundo a norma ISO 16283-1:2014[11] (CEN 2014).

No que diz respeito aos restantes elementos, tanto a porta como a janela e a respetiva caixa de estores mantiveram-se. A parede divisória interior que separa o quarto dos restantes compartimentos do apartamento é em alvenaria de 70 mm rebocada de ambos os lados. Na Figura 72 é apresentado o gráfico relativo ao índice de redução sonora da parede divisória.

[10] A Norma ISO 16283-2:2020 especifica os procedimentos para determinar isolamento sonoro a sons de percussão utilizando medições de pressão sonora com uma fonte de impacto a operar num piso ou escada de um edifício. Estes procedimentos destinam-se a volumes ambiente na gama de 10 $m^3$ a 250 $m^3$ e na gama de frequências de 50 Hz a 5000 Hz. Os resultados dos ensaios podem ser utilizados para quantificar, avaliar e comparar o isolamento acústico em a sons de percussão em salas mobiladas ou não mobiladas onde o campo sonoro pode ou não aproximar-se de um campo difuso.

[11] A Norma ISO 16283-1:2014 especifica os procedimentos para determinar o isolamento sonoro a sons aéreos entre duas salas de um edifício utilizando medições de pressão sonora. Estes procedimentos destinam-se a volumes ambiente na gama de 10 $m^3$ a 250 $m^3$ e na gama de frequências de 50 Hz a 5000 Hz. Os resultados dos ensaios podem ser utilizados para quantificar, avaliar e comparar o isolamento a sons aéreos em salas mobiladas ou não mobiladas, onde o campo sonoro pode ou não aproximar-se de um campo difuso. O isolamento a sons aéreos depende da frequência e pode ser convertido numa quantidade numérica única para caracterizar o desempenho acústico utilizando os procedimentos de classificação da Norma ISO 717-1.

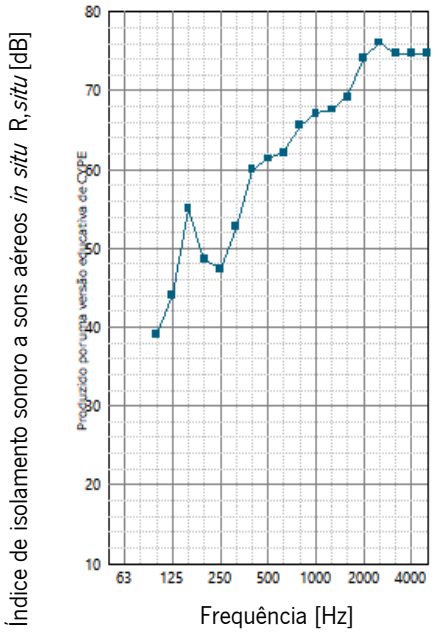



| Freq. | Ln,situ |
|---|---|
| 50 | - |
| 63 | - |
| 80 | - |
| 100 | 39.5 |
| 125 | 50.1 |
| 160 | 48.9 |
| 200 | 50.3 |
| 250 | 54.6 |
| 315 | 52.5 |
| 400 | 50.9 |
| 500 | 47.8 |
| 630 | 48.2 |
| 800 | 48.2 |
| 1000 | 48.6 |
| 1250 | 48.8 |
| 1600 | 46.6 |
| 2000 | 43.3 |
| 2500 | 40.0 |
| 3150 | 35.4 |
| 4000 | 35.4 |
| 5000 | 35.4 |
| Hz | dB |

$L_{n,w}$ (CI) = 50 (-4) dB

Nota: Os valores de referência para a norma ISO 16283-2:2020 localizam-se entre 100-3150 para a banda de 1/3 oitava, para as frequências 4000 Hz e 5000 Hz foram inseridos com o mesmo valor da frequência de 3150 Hz de modo a não prejudicar a visibilidade do gráfico.

Figura 70 – Índice de isolamento sonoro a sons de percussão da laje de separação de frações, medido in situ (adaptado de (Da Silva,2009; *CYPE Ingenieros 2024a*))

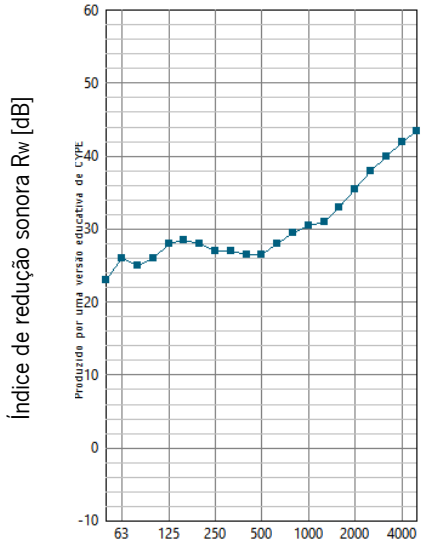



| Freq. | R,situ |
|---|---|
| 50 | - |
| 63 | - |
| 80 | - |
| 100 | 39.1 |
| 125 | 44.1 |
| 160 | 55.0 |
| 200 | 48.6 |
| 250 | 47.4 |
| 315 | 52.7 |
| 400 | 60.0 |
| 500 | 61.4 |
| 630 | 62.2 |
| 800 | 65.6 |
| 1000 | 67.1 |
| 1250 | 67.6 |
| 1600 | 69.2 |
| 2000 | 74.2 |
| 2500 | 76.1 |
| 3150 | 74.7 |
| 4000 | 74.7 |
| 5000 | 74.7 |
| Hz | dB |

$R_w(C;C_{tr})$ = 62 (-2;-7) dB

Nota: Os valores de referência para a norma ISO 16283-1:2020 localizam-se entre 100-3150 para a banda de 1/3 oitava, para as frequências 4000 Hz e 5000 Hz foram inseridos com o mesmo valor da frequência de 3150 Hz de modo a não prejudicar a visibilidade do gráfico.

Figura 71 – Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea da laje de separação de frações, medido *in situ* (adaptado de (Da Silva,2009; *CYPE Ingenieros 2024a*))




| Freq. | R,labo |
|---|---|
| 50 | 23.0 |
| 63 | 26.0 |
| 80 | 25.0 |
| 100 | 26.0 |
| 125 | 28.0 |
| 160 | 28.5 |
| 200 | 28.0 |
| 250 | 27.0 |
| 315 | 27.0 |
| 400 | 26.5 |
| 500 | 26.5 |
| 630 | 28.0 |
| 800 | 29.5 |
| 1000 | 30.5 |
| 1250 | 31.0 |
| 1600 | 33.0 |
| 2000 | 35.5 |
| 2500 | 38.0 |
| 3150 | 40.0 |
| 4000 | 42.0 |
| 5000 | 43.5 |
| Hz | dB |

Rw (C; Ctr; C50-3150; Ctr50-3150) = 31 (0;-1;0;-2) dB

Figura 72 – Índice de redução sonora da parede divisória em alvenaria (adaptado de (*CYPE Ingenieros 2024a*))

Os dados foram inseridos novamente no programa *Acoubat*, nas Tabelas 27, 28, 29 e 30 é feita a verificação para paredes convencionais em alvenaria no que respeita o isolamento sonoro a sons aéreos e para a laje de separação de frações em betão no que toca também ao isolamento sonoro a sons de percussão.

Tabela 27 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho acústico da parede de fachada em alvenaria (adaptado de Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008))

| **Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea, $D_{2m,nT,w}$ Entre o exterior (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (receção)** | **Valor regulamentar (dB)** | **$D_{2m,nT,w}$ obtido (dB)** | **Verificação** |
|---|---|---|---|
| Zonas Sensíveis | ≥ 28 | 40 | ✓ |
| Zonas Mistas | ≥ 33 | | |

Tabela 28 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho acústico da parede de meeira ou interior em alvenaria(adaptado de (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008))

| **Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea, $D_{nT,w}$ Entre o espaço abaixo indicado (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (receção)** | **Valor Regulamentar (dB)** | **$D_{nT,w}$ obtido (dB)** | **Verificação** |
|---|---|---|---|
| Compartimentos de um fogo | ≥ 50 | 43 | ✗ |
| Locais de circulação do edifício | ≥ 48 | | |
| Garagem de parqueamento | ≥ 50 | | |
| Caminho de circulação automóvel (edifício com elevadores) | ≥ 40 | | ✓ |
| Locais de comércio, indústria, serviços ou diversão | ≥ 58 | | ✗ |

Tabela 29 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho acústico da laje aligeirada de separação de frações, sons de percussão (adaptado de (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008))

| **Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Percussão, $L'_{nT,w}$ Entre o espaço/situação abaixo indicada (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (receção)** | **Valor Regulamentar (dB)** | **$L'_{nT,w}$ obtido (dB)** | **Verificação** |
|---|---|---|---|
| Pavimentos de outros fogos ou locais de circulação comum (excetuando se o local emissor for um caminho de circulação vertical, em edifício servido por ascensores) | ≤ 60 | 51 | ✓ |
| Locais de comércio, indústria, serviços ou diversão | ≤ 50 | | ✗ |

Tabela 30 – Verificação do cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho acústico da laje aligeirada de separação de frações, sons aéreos (adaptado de (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008))

| **Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea, $D_{nT,w}$ Entre o espaço abaixo indicado (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (receção)** | **Valor Regulamentar (dB)** | **$D_{nT,w}$ obtido (dB)** | **Verificação** |
|---|---|---|---|
| Compartimentos de um fogo | ≥ 50 | 59 | ✓ |
| Locais de circulação do edifício | ≥ 48 | | |
| Garagem de parqueamento | ≥ 50 | | |
| Caminho de circulação automóvel (edifício com elevadores) | ≥ 40 | | |
| Locais de comércio, indústria, serviços ou diversão | ≥ 58 | | |

No caso das soluções com utilização de elementos mais convencionais, a parede de fachada com ETICS cumpriu os requisitos acústicos. A parede meeira ou interior em alvenaria não cumpriu os requisitos relativos a elementos de separação entre compartimentos de fogos, apenas cumprindo os requisitos relativos a um caminho de circulação vertical (edifício com elevadores). Para esta solução, seria necessário o aumento da espessura da lã de rocha ou a utilização de outros materiais como por exemplo mantas acústicas. No caso da laje aligeirada, esta cumpriu os requisitos para o isolamento a sons de percussão no caso de ser um elemento de separação entre habitações, não cumprindo os requisitos para elementos de separação entre habitações e locais de comércio, indústria, serviços ou diversão, se estas zonas se localizarem numa posição superior. No caso do desempenho a sons aéreos, a laje cumpriria os requisitos em todos os espaços.

Comparando as duas paredes de fachada com ETICS, ambas obtiveram o mesmo resultado no que toca ao seu isolamento sonoro. Os resultados mostraram que a parede de fachada em madeira possui um bom comportamento acústico comparando à solução em alvenaria, sendo as diferenças pequenas entre ambas, também condicionado pela utilização do mesmo vão envidraçado em ambas as soluções. No caso da parede meeira ou interior, a solução em madeira apresentou melhor prestação ao longo de toda

a gama de frequências comparando com a parede de alvenaria, tal deveu-se ao facto da utilização da camada de isolamento entre barrotes que aumenta consideravelmente o desempenho acústico desta solução, podendo no caso da parede de alvenaria o desempenho acústico ser melhorado aumentando a espessura da camada de material absorvente acústico ou pela utilização de mantas acústicas. A utilização de camadas resiliente em paredes de madeira não é essencial para o seu desempenho acústico. Por último, no caso da laje de separação entre pisos, é onde se verifica o pior comportamento da solução em madeira em comparação com a laje aligeirada. A solução em laje aligeirada apresentou um comportamento melhor tanto no isolamento a sons de percussão como a sons aéreos, sem necessitar de teto falso, por exemplo. Ao contrário do que acontece em paredes, a camada resiliente é essencial para a melhoria do desempenho acústico das lajes em madeira.

No Anexo 11, encontram-se os dados inseridas no programa *Acoubat* assim como os resultados paras a diferentes soluções construtivas analisadas, sendo este Anexo dividido em 3 partes. O Anexo 11.1 inclui o quadro resumo das soluções utilizadas no programa. O Anexo 11.2, apresenta a listagem de resultados para todos os compartimentos em estudo. Já no Anexo 11.3, estão presentes os gráficos com os resultados do isolamento sonoro das soluções de parede e laje relativamente a sons aéreos e de percussão. O Anexo 11.3, será apenas relativo a 1 dos compartimentos (Quarto 1), quer para a solução de madeira, quer para a solução de alvenaria.

# 6. Considerações finais

Segundo a Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019(2019), é na década de 2021-2030 que se devem concentrar mais esforços em busca de um futuro neutro em carbono. A construção em madeira é uma das soluções que pode desempenhar um papel importante numa era em que a descarbonização e o combate às alterações climáticas e emissões de gases com efeito de estufa é essencial, de forma a promover qualidade de vida das gerações futuras.

A construção em madeira, apesar de ser usada desde a antiguidade, não é atualmente muito utilizada em Portugal, sendo mais utilizada em diversos países europeus, especialmente os nórdicos. Atualmente, a utilização de produtos derivados da madeira é cada vez mais usual devido ao seu bom desempenho estrutural. Existem várias soluções construtivas em madeira tanto em elementos de parede como de laje que apresentam um bom desempenho térmico e acústico (isolamento a sons aéreos e de percussão), mas que não são muito conhecidas nem utilizadas em Portugal, não existindo uma sistematização da informação.

Para disseminar e impulsionar a construção em madeira em Portugal, neste estudo foram referidos exemplos de edifícios com estrutura em madeira, destacando-se o *Stadthaus* pela utilização de painéis CLT em grande parte da sua envolvente, incluindo caixa de escadas, sendo apenas excluídas as fundações e o rés-do-chão. Para sistematizar a informação relativa ao desempenho de soluções construtivas em madeira, foram estudados diversos materiais absorventes (orgânicos, inorgânicos, naturais, compósitos e mantas acústicas) que podem ser integrados em soluções construtivas em madeira. Foram analisadas as suas principais características em termos de parâmetros como a condutibilidade térmica e o coeficiente de absorção sonora. Foi também analisado o comportamento destes materiais quando aplicados em elementos construtivos, sendo analisado o seu desempenho térmico, acústico, resistência ao fogo, impactes ambientais, custos e disponibilidade em Portugal.

Tendo a informação relativa aos diversos materiais, foi efetuada a avaliação de desempenho atribuindo pesos aos diferentes parâmetros em estudo destacando-se o seu desempenho térmico e acústico com 30% e os restantes, como a resistência ao fogo, impactes ambientais, custos e disponibilidade em Portugal com 10%. A avaliação para os diferentes parâmetros teve por base os valores da condutibilidade térmica, resistência à difusa de água, coeficientes de absorção sonora, classe de resistência ao fogo, carbono incorporado, custos (€/$m^2$), a sua produção em Portugal e disponibilidade comercial. Foram avaliados todos os materiais, os poliestirenos (EPS e XPS), lãs minerais (rocha e vidro),

naturais (cortiça, fibra de madeira, celulose, cânhamo, lã de ovelha, borracha), compósitos (painel de cimento e partículas de madeira), e mantas acústicas (MAD e IMPACTODAN). Os resultados obtidos na avaliação dos materiais mostraram que as lãs minerais e a cortiça são os materiais mais vantajosos no que toca à sua aplicação em edifícios com soluções construtivas em madeira. A lã de vidro apresenta o melhor resultado na avaliação dos materiais absorventes estudados tendo um excelente desempenho térmico a longo prazo e bom desempenho acústico, sendo também de destacar a sua resistência ao fogo. A lã de rocha também foi um dos materiais que se destacou no seu desempenho térmico e acústico tendo também como ponto principal a sua disponibilidade em território nacional. Por último, a cortiça também se destacou com material absorvente que poderia ser utilizado na construção em madeira, sendo também a sua produção realizada a nível nacional e tendo como ponto positivo a sua utilização em climas húmidos, ao contrário dos restantes materiais naturais que necessitam de tratamento para a melhoria do seu desempenho à ação da água. A cortiça também apresentou também um bom desempenho tanto térmico como acústico.

Após a avaliação dos materiais, foi analisado e comparado o desempenho de soluções construtivas em madeira e em alvenaria, tendo em conta o cumprimento dos requisitos regulamentares portugueses no que toca ao seu desempenho térmico e acústico, através da determinação do coeficiente de transmissão térmica e do valor dos índices de isolamento sonoro a sons aéreos (paredes e lajes) e de percussão (lajes). As soluções de paredes de fachada analisadas consistiam em paredes com sistema ETICS com a utilização de lã de rocha como material absorvente e de isolamento térmico. As paredes meeiras analisadas consistiram em paredes duplas com estrutura em barrotes de madeira, com isolamento em lã de rocha e paredes duplas em alvenaria de tijolo cerâmico no caso da solução convencional. No caso das lajes foi analisada uma laje CLT e uma laje aligeirada. Verificou-se que o desempenho térmico das soluções construtivas em madeira foi superior no que toca ao coeficiente de transmissão térmica, sendo, no caso de paredes, a utilização de isolamento térmico entre barrotes de madeira a proporcionar um coeficiente de transmissão térmica baixo. No caso da solução de laje em madeira seria necessário o aumento da espessura da camada de isolamento para cumprir os requisitos das zonas climáticas Portuguesas mais severas. No caso das soluções convencionais o desempenho térmico foi mais reduzido, mostrando o bom desempenho térmico das soluções construtivas em madeira. Tendo Portugal um clima temperado não seria necessário a utilização de camadas de isolamento térmico com uma espessura tão elevada como as soluções em madeira analisadas (selecionadas face à existência da informação necessária à realização deste estudo), sendo necessário analisar o comportamento das mesmas tendo em conta as espessuras mais usuais em território nacional.

Já para o seu desempenho acústico, as soluções de parede em madeira apresentaram um bom comportamento quando aplicados a um sistema construtivo, cumprindo a regulamentação portuguesa no caso da sua utilização em edifícios de habitação. Comparando soluções de parede em madeira e alvenaria o isolamento acústico não apresenta diferenças significativas no que toca a paredes de fachada com sistema ETICS. Para as paredes meeiras ou interiores a diferença de desempenho entre a parede de madeira e a de alvenaria foi significativa devido à utilização da camada de isolamento entre os barrotes de madeira que permitiram o aumento do desempenho térmico da solução construtiva. No caso da parede de alvenaria seriam necessárias alterações de forma a melhorar o seu desempenho acústico. Quanto às lajes, tanto no isolamento sonoro a sons aéreos como de percussão a utilização de soluções em madeira apresentou desvantagens em relação à solução em laje convencional, sendo uma delas a necessidade de implementação de teto falso que não é necessário na laje aligeirada. No caso de lajes em estrutura de madeira a existência de uma camada de material resiliente é importante para o amortecimento de vibrações no que toca ao isolamento a sons de percussão, principalmente, e a utilização de teto falso no que toca ao seu isolamento a sons aéreos.

Na presente dissertação conclui-se que a construção em madeira apresenta um bom desempenho térmico, possibilitando soluções construtivas mais leves, construção mais rápida e eficiente numa altura em que a procura por habitação é elevada. Em Portugal deve ser incentivada a construção em madeira dado o clima temperado e a necessidade de combater a falta de habitação, no entanto deve ser avaliado o impacto da inercia térmica fraca deste tipo de edifícios no seu desempenho térmico, em especial considerando o cenário de alterações climáticas que podem levar à necessidade da compatibilização da madeira com materiais pesados, como o caso do betão. O desempenho acústico a baixas frequências é uma desvantagem que a construção em madeira possui, no entanto, a utilização de materiais absorventes e camadas resilientes (no caso de pavimentos) pode colmatar o desconforto sonoro. Também deve ser incentivada a produção de matéria-prima própria para construção de estruturas de madeira em Portugal de forma a diminuir a necessidade da sua importação, reduzindo os seus impactos ambientais.

## 6.1 Dificuldades encontradas

Seguidamente são apresentadas as dificuldades encontradas no decorrer da dissertação:

- Encontrar informação relativa a soluções construtivas que revelassem tanto o desempenho térmico como acústico e utilizadas em edifícios de madeira;
- A caracterização de pavimentos resilientes no que toca aos materiais que os constituem;

- Nos catálogos analisados é raro encontrar materiais onde seja indicada a absorção sonora dos materiais, sendo muitas vezes apelidados de materiais com "bom desempenho acústico" sem que tal desempenho seja materializado em dados, como o seu índice de redução sonoro ou o incremento de desempenho acústico tanto a sons aéreos como de percussão;
- A construção em madeira ainda apresenta poucos estudos realizados *in situ*, o que dificulta perceber o seu desempenho, principalmente acústico, efetivo.

## 6.2 Sugestões de estudos futuros

De seguida são sugeridas algumas sugestões de estudos futuros:

- Quantificação do custo global de aplicação de soluções construtivas num edifício de apartamentos em construção pré-fabricada em madeira em Portugal;
- Aplicação de materiais de isolamento térmico nas soluções construtivas com valores usualmente utilizados em edifícios portugueses e caracterização do seu desempenho térmico e acústico;
- Avaliação dos impactes ambientais ao longo do ciclo de vida de um edifício tipo pré-fabricado em madeira (usando, por exemplo o SBtool);
- Quantificação do isolamento sonoro de estruturas em madeira *in situ* comtemplando o cálculo das transmissões marginais entre os elementos construtivos;
- Ter em conta a transmissão sonora proveniente de equipamentos, como por exemplo os de aquecimento, ventilação e ar condicionado;
- Simulação do desempenho global de um edifício em madeira de acordo com a metodologia de certificação energética da regulamentação portuguesa;
- Avaliação, por simulação dinâmica, do desempenho térmico de edifícios em madeira tendo em conta as condições climáticas correntes (dos últimos 30 anos) e considerando a sua resiliência às alterações climáticas;
- Identificação do tipo de madeira possível de ser utilizada em edifícios existente no parque florestal português.

## Referências Bibliográficas


Abdel Kader, M. M., Abdel-wehab, S. M., Helal, M. A., & Hassan, H. H. (2012). Evaluation of thermal insulation and mechanical properties of waste rubber/natural rubber composite. *HBRC Journal*, *8*(1), 69–74.

Abrahamsen, R. (2017, Dezembro). Mjøstårnet-Construction of an 81 m tall timber building. *Internationales Holzbau-Forum IHF 2017*. (Vol. 2017). https://www.moelven.com/

Adera. (sem data). *Virtuoso*. Acedido em 16 de Março de 2024. Disponível em: https://adera.com/properties/virtuoso-2/

Agência Portuguesa do Ambiente. (2019). Roteiro Para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050)– Estratégia de Longo Prazo Para a Neutralidade Carbónica da Economia Portuguesa em 2050. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RNC2050_PT-22-09-2019.pdf

Akin, C. S., Irfan, A. R., & Hacioğlu, S. (2023). Life Cycle Assessment (LCA) Case Study on Cement-bonded Particle Board Produced By Using Construction Demolition Wood Waste. *MAS Journal of Applied Sciences, 8*(Özel Sayi), 897–906.

Ambiente e Ação Climática – Direção-Geral de Energia e Geologia. (2021). "Despacho n.º 6476-H/2021".*Diário da República* 2ª Série, 126 (julho). https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/despacho/6476-h-2021-166300890

Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e Habitação (2021). "Portaria n.º 138-I/2021 (2021)". *Diário da República* 1ª série, 126 (julho). https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/138-i-2021-166296492

Amir, N., Roslan, M. H., & Ahmad, F. (2015). Fire Resistance of Glass Wool and Rockwool Hybrid Fibre Reinforced Intumescent Coating. *Journal of Advanced Research in Materials Science, 12*(1),24–32.

Amiri, A., Ottelin, J., Sorvari, J., & Junnila, S. (2020). Cities as carbon sinks - Classification of wooden buildings. *Environmental Research Letters*, *15*(9), 094076.

Amorim. (sem data). Acedido em 12 de Setembro de 2024. Disponível em: https://www.amorim.com/

Archello. (sem data). *Hybrid Apartment Building in Amsterdam*. Acedido em 23 de Agosto de 2024. Disponível em: https://archello.com/it/project/hybrid-apartment-building-stories

Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2008). Sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs. *Journal of the Acoustical Society of America*, *123*(5), 3037.

Autodesk. (2023). *Autocad* . Versão estudante.

Baldinelli, G., Asdrubali, F., Baldassarri, C., Bianchi, F., D'Alessandro, F., Schiavoni, S., & Basilicata, C. (2014). Energy and environmental performance optimization of a wooden window: A holistic approach. *Energy and Buildings*, *79*, 114–131.

Baldinelli, G., Asdrubali, F., & Presciutti, A. (2013). Acoustic optimization of windows and doors through sound intensity measurements. *Proceedings of the 20th International Congress on Sound and Vibration ICSV20, Bangkok, Thailand.*

Balmori, J. A., Casado-Sanz, M., Machimbarrena, M., Quirós-Alpera, S., Mostaza, R., & Acuña, L. (2024). The Use of Waste Tyre Rubber Recycled Products in Lightweight Timber Frame Systems as Acoustic Insulation: A Comparative Analysis of Acoustic Performance. *Buildings*, *14*(1), 35.

Barreca, F., & Fichera, C. R. (2016). Thermal insulation performance assessment of agglomerated cork boards. *Wood and Fiber Science, 48*(2), 96–103.

Bessa, J., Nobre, L., Cunha, F., & Fangueiro, R. (2018). Recovery of mineral dust in composite materials. https://hdl.handle.net/1822/58455

Bettarello, F., Gasparella, A., & Caniato, M. (2021). The influence of floor layering on airborne sound insulation and impact noise reduction: A study on cross laminated timber (CLT) structures. *Applied Sciences*, *11*(13), 5938

Biswas, K., Shrestha, S. S., Bhandari, M. S., & Desjarlais, A. O. (2016). Insulation materials for commercial buildings in North America: An assessment of lifetime energy and environmental impacts. *Energy and Buildings*, *112*, 256–269.

Bokerne, A. (2023). *Hybrid Apartment Building in Amsterdam by Olaf Gipser Architects*. Detail. Acedido em 8 de Março de 2024. Disponível em: https://www.detail.de/de_en/hybrid-wohngebaude-in-amsterdam-von-olaf-gipser-architects

Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, *74*(3), 331–351.

*Bricomarché*. (sem data) Acedido em 19 de Setembro de 2024. Disponível em: https://www.bricomarche.pt/

Cai, M., Chen, S., Tang, Y., Li, Q., & An, W. (2019). Study on the influence of enclosed vertical channels on downward flame spread over XPS thermal insulation materials. *Case Studies in Thermal Engineering*, *14*, 100486

Cânhamor. (2022). *Construir com Cânhamo*. Acedido em 6 de Dezembro de 2023. Disponível em: https://canhamorhemp.com/articles/construir-com-canhamo/

Caniato, M., Bettarello, F., Fausti, P., Ferluga, A., Marsich, L., & Schmid, C. (2017). Impact sound of timber floors in sustainable buildings. *Building and Environment*, *120*, 110–122.

Caniato, M., Bettarello, F., Ferluga, A., Marsich, L., Schmid, C., & Fausti, P. (2017). Acoustic of lightweight timber buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80,* 585–596.

Caniato, M., Bonfiglio, P., Bettarello, F., & Gasparella, A. (2019). Innovative approach in acoustic simulation of timber walls. *16th IBPSA International Conference and Exhibition, Rome.*

CEN, Timber structures – Cross laminated timber – Requirements. EN 16351, 2015.

Chang, S. J., Kang, Y., Yun, B. Y., Yang, S., & Kim, S. (2021). Assessment of effect of climate change on hygrothermal performance of cross-laminated timber building envelope with modular construction. *Case Studies in Thermal Engineering*, *28*, 101703.

Cherradi, Y., Rosca, I. C., Cerbu, C., Kebir, H., Guendouz, A., & Benyoucef, M. (2021). Acoustic properties for composite materials based on alfa and wood fibers. *Applied Acoustics*, *174*, 107759.

Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Graedel, T. E., & Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, *3*(4), 269–276.

Chung, H., Dodd, G., Emms, G., Mcgunnigle, K., & Schmid, G. (2006). FWPRDC Project PN04.2005. Maximising impact sound resistance of timber framed floor/ceiling systems. Tech. Rept. PN04.2005, The Forest and Wood Products Research and Development Corporation. *Austrlian Government, 2006*.

Chung, H., Emms, G., & Fox, C. (2014). Vibration reduction in lightweight floor/ceiling systems with a sand-sawdust damping layer. *Acta Acustica United with Acustica*, *100*(4), 628–639.

Coentrão, A. (2024). A partir do Alentejo, a Cânhamor quer ajudar a descarbonizar as nossas casas. Público. Acedido em 12 de Setembro de 2024. Disponível em: https://www.publico.pt/2024/01/17/local/noticia/partir-alentejo-canhamor-quer-ajudar-descarbonizar-casas-2076860

Cole, R. J. (1998). Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems. *Building and Environment*, *34*(3), 335–348.

Comissão Europeia. (2011). Comunicação da comissão ao parlamento europeu, ao conselho, ao comité económico e social europeu e ao comité das regiões. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0571

Comissão Europeia. (2017). Decisão (UE) 2017/ 176 da comissão. *Jornal Oficial da União Europeia*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017D0176

Comité Económico e Social Europeu. (2023). Parecer do Comité Económico e Social Europeu-Construção em madeira para reduzir as emissões de CO 2 no setor da construção (Parecer exploratório a pedido da Presidência sueca do Conselho). *Jornal Oficial da União Europeia*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022AE6006

Corticeira Amorim. (2016). *Amorim Isolamentos, S.A.* Acedido 6 de Abril de 2024. Disponível em: https://daphabitat.pt/assets/Uploads/dap/pdfs/0d76239fc3/Dap_ICB_PT_06-10-2016.pdf

Cozzarini, L., Marsich, L., Ferluga, A., & Schmid, C. (2020). Life cycle analysis of a novel thermal insulator obtained from recycled glass waste. *Developments in the Built Environment*, *3*, 10014.

Crosslam. (sem data). *Cross Laminated Timber*. Acedido em 20 de Agosto de 2024. Disponível em: https://crosslam.com.br/

CYPE Ingenieros, S. A. (2024). *AcouBAT by CYPE Versão 2024.c.CYPE*.

CYPE Ingenieros, S. A. (2024). *Cypetherm SCE-HAB Versão 2024.b.CYPE.*

CYPE Ingenieros, S. A. (2023). Gerador de Preços para construção civil. *CYPE.* https://geradordeprecos.info/

Danosa. (2016). *Danosa Building Together*. Acedido em 13 de Agosto de 2023. Disponível em: https://www.danosa.com/pt-pt/wp-content/uploads/sites/5/2021/12/DANOSA-Declaracao-Ambiental-de-Produto.pdf

Danosa. (sem data). *Danosa Building Together*. Acedido em 15 de Agosto de 2023. Disponível em: https://www.danosa.com/pt-pt/

Danosa. (2020a). *Danosa, Derivados Asfálticos Normalizados, S.A.* Acedido em 10 de Agosto de 2023. Disponível em: https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/645fb667-dda3-47b8-a9b1-fd35808a07e9/Data

Danosa. (2020b). *Danosa, Derivados Asfálticos Normalizados, S.A.* Acedido em 10 de Agosto de 2023. Disponível em: https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/c6b9837c-705a-45c0-6986-08d9b3ca1199/Data

Danosa. (sem data). *Poliestireno Extrudido*. Acedido em 1 de Maio de 2023. Disponível em: https://www.danosa.com/pt-pt/familia/poliestireno-extrudido-xps/

Danovska, M., Pernigotto, G., Baggio, P., & Gasparella, A. (2022). Simulation uncertainty in heat transfer across timber building components in the Italian climates: The role of thermal conductivity. *Energy and Buildings*, *268*, 112190.

Da Silva, S. M. G. M. (2009). *A Sustentabilidade e o Conforto das Construções*. [Tese de Doutoramento, Universidade do Minho (Portugal)]. https://hdl.handle.net/1822/10245

dataholz.eu. (2024). *dataholz*. Acedido em 30 de Março de 2024. Disponível em: https://www.dataholz.eu/index.htm

De Sousa, F. A. F. D. (2010). Optimização de métodos de escolha de materiais com base no desempenho sustentável [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. http://hdl.handle.net/10216/59127

Dehane, B., Madrigal, J., Hernando, C., Bouhraoua, R., & Guijarro, M. (2015). New bench-scale protocols for characterizing bark flammability and fire resistance in trees: Application to Algerian cork. *Journal of Fire Sciences*, *33*(3), 202–217.

Dénes, O., Florea, I., & Manea, D. L. (2019). Utilization of Sheep Wool as a Building Material. *Procedia Manufacturing*, *32*, 236–241.

Di Bella, A., & Mitrovic, M. (2020). Acoustic characteristics of cross-laminated timber systems. *Sustainability, 12*(14), 5612.

Dickson, T., & Pavía, S. (2021). Energy performance, environmental impact and cost of a range of insulation materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *140*, 110752.

Direção-Geral de Energia e Geologia. (2021). *Manual SCE* (ADENE). https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2021/09/Manual-SCE-v1.pdf

Dos Santos, C. A. P., & Matias, L. (2006). ITE50–Coeficientes de transmissão Térmica de elementos da envolvente dos Edifícios–Laboratório Nacional de Engenharia Civil. *Versão actualizada.*

Duarte, A. P., Gonçalves, A., Loureiro, D., & Mónica, R.-R. L. (2022). Soluções Sustentáveis de Isolamento para Edifícios NZEB. *Laboratório Nacional de Energia e Geologia*. https://www.lneg.pt/wp-content/uploads/2023/01/solucoes-sustentaveis-de-isolamento-para-edificios-nZEB.pdf

Ekolution AB. (2020). *Ekolution® Hemp Fibre Insulation.* Acedido em 10 de Agosto de 2023. Disponível em: https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/abbc9f31-db9e-4662-a281-08db196e9a1c/Data

EN 13501-1. *Fire classification of construction products and building elements*. Classification using data from reaction to fire tests.

EPS- Empresa de Poliestireno Expandido. (sem data). Acedido em 12 de Setembro de 2024. Disponível em: https://www.eps-lda.pt/

Evola, G., Cascone, S., Sciuto, G., & Parisi, C. B. (2019, Setembro). Performance comparison between building insulating materials made of straw bales and EPS for timber walls. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol.609, No, 7 , p.072020). IOP Publishing.

Eynard, H. (2002). *La Forêt* (1ª edição). Éditions Fleures, Paris

European committee for Standardization CEN. (2007). EN ISO 10456. Building materials and products, Hygrothermal properties, Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values.

Fibran Energy Shield. (sem data). Acedido em 12 de Setembro de 2024. Disponível em: https://fibran.pt/

Fibrosom. (sem data). *Poliestireno Expandido (XPS)*. Acedido em 6 de Dezembro de 2023. Disponível em: https://www.fibrosom.com/ficheiros/pdfs/POLIESTIRENOEXTRUDIDO.pdf

Freitas, V. P. de, & Pinto, P. da S. (1998). Permeabilidade ao vapor de materiais de construção: condensações internas-NIT 002.

Fu, H., Ding, Y., Li, M., Li, H., Huang, X., & Wang, Z. (2020). Research on thermal performance and hygrothermal behavior of timber-framed walls with different external insulation layer: Insulation Cork Board and anti-corrosion pine plate. *Journal of Building Engineering*, *28*, 101069.

Füchsl, S., Rheude, F., & Röder, H. (2022). Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A critical review. *Cleaner Materials*, *5*, 100119.

Gaujena, B., Agapovs, V., Borodinecs, A., & Strelets, K. (2020). Analysis of thermal parameters of hemp fiber insulation. *Energies*, *13*(23), 6385.

Georgescu, S. V., Şova, D., Campean, M., & Coşereanu, C. (2022). A Sustainable Approach to Build Insulated External Timber Frame Walls for Passive Houses Using Natural and Waste Materials. *Forests*, *13*(4), 522.

Gil, L. (2007). A cortiça como material de construção - Manual Técnico. *Lisboa: APCOR*. https://www.academia.edu/9138885/A_corti%C3%A7a_como_material_de_constru%C3%A7%C3%A3o

Gil, L. (1998). Cortiça - Produção, Tecnologia e Aplicação, Ed INETI.

Gil, L. (2015). New cork-based materials and applications. *Materials, 8*(2), 625–637.

Gomes, R., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2020). Environmental life cycle assessment of the manufacture of EPS granulates, lightweight concrete with EPS and high-density EPS boards. *Journal of Building Engineering*, *28*, 101031.

Gonçalves, F. (2022). *Madeira e tecnologia: o casamento que vai revolucionar a construção*. Acedido em 8 de Fevereiro de 2023. Disponível em: https://www.idealista.pt/news/imobiliario/construcao/2022/01/25/50653-madeira-e-tecnologia-o-casamento-que-vai-revolucionar-a-construcao

Göswein, V., Silvestre, J. D., Sousa Monteiro, C., Habert, G., Freire, F., & Pittau, F. (2021). Influence of material choice, renovation rate, and electricity grid to achieve a Paris Agreement-compatible building stock: A Portuguese case study. *Building and Environment*, *195*, 107773.

Grazieschi, G., Asdrubali, F., & Thomas, G. (2021). Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review. *Cleaner Environmental Systems*, *2*, 100032.

Greenfield, M. (2024). *Comparing EPS insulation and XPS insulation.* https://todayshomeowner.com/insulation/reviews/eps-insulation-vs-xps-insulation/

Gullbrekken, L., Schjøth Bunkholt, N., Geving, S., & Rüther, P. (2020). Air leakage paths in buildings: Typical locations and implications for the air change rate. *E3S Web of Conferences* (Vol. 172, p.05010). EDP Sciences.

Gustavsen, A., Arasteh, D., Jelle, B. P., Curcija, C., & Kohler, C. (2008). Developing low-conductance window frames: Capabilities and limitations of current window heat transfer design tools - State-of-the-art review. *Journal of Building Physics*, *32*(2), 131–153.

Hamilton, I., Kennard, H., Rapf, O., Kockat, J., Zuhaib, S., Toth, Z., Barrett;Margaux, & Milne, C. (2022). *2022 Global Status Report for Buildings And Construction*. https://globalabc.org/sites/default/files/2022-11/FULL%20REPORT_2022%20Buildings-GSR_1.pdf

Hassan, O. A. B., AA, N. E., & Abdulahad, G. (2022). A comparative study between glulam and concrete columns in view of design, economy and environment. *Case Studies in Construction Materials*, *16*, e00966.

Hemmilä, V., Adamopoulos, S., Karlsson, O., & Kumar, A. (2017). Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels-A Review. *RSC Advances, 7*(61), 38604–38630.

Henderson, J., Foster, S., & Bridgestock, M. (2012). *Brettstapel- what are the benefits?* Acedido em 7 de Fevereiro de 2023. Disponível em: http://www.brettstapel.org/Brettstapel/Why.html

Hildebrandt, J., Hagemann, N., & Thrän, D. (2017). The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in europe. *Sustainable Cities and Society*, *34*, 405–418.

Hill, C., Norton, A., & Dibdiakova, J. (2018). A comparison of the environmental impacts of different categories of insulation materials. *Energy and Buildings*, *162*, 12–20.

Hisour. (sem data). *Estilo Pombalino*. Acedido em 5 de Abril de 2023. Disponível em: https://www.hisour.com/pt/pombaline-style-29533/

Hoes, P., & Hensen, J. L. M. (2016). The potential of lightweight low-energy houses with hybrid adaptable thermal storage: Comparing the performance of promising concepts. *Energy and Buildings*, *110*, 79–93.

Hongisto, V. (2000). Sound insulation of doors - Part 1: prediction models for structural and leak transmission. *Journal of Sound and Vibration*, *230*(1), 133–148.

Hongisto, V., Keränen, J., & Lindgren, M. (2000). Sound insulation of doors - Part 2: Comparison between measurement results and predictions. *Journal of Sound and Vibration*, *230*(1), 149–170.

Hongisto, V., Saarinen, P., Alakoivu, R., & Hakala, J. (2022). Acoustic properties of commercially available thermal insulators – an experimental study. *Journal of Building Engineering*, *54*, 104588.

How, S. S., Sik, H. S., & Anwar, M. K. U. (2016). An Overview of Manufacturing Process of Glued-Laminated Timber. *Timber Technol Bull* (63).

Hult, M., & Karlsmo, S. (2022). Life Cycle Environmental and Cost Analysis of Building Insulated with Hemp Fibre Compared to Alternative Conventional Insulations – a Swedish Case Study. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, *30*(1), 106–120.

Pásztory, Z. (2021). An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering, 44*, 102604.

Hurmekoski, E. (2017). How can wood construction reduce environmental degradation? *European Forest Institute.* https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/efi_hurmekoski_wood_construction_2017_0.pdf

Iannace, G., Ciaburro, G., Guerriero, L., & Trematerra, A. (2020). Use of cork sheets for room acoustic correction. *Journal of Green Building*, *15*(2), 45–55.

IBERA Indústria de betão, S. A. (2017). Fichas Técnicas. *IBERA Indústria de Betão, S.A.* (1)

IGI. (2024). *IGI – The Global Wallcoverings Association.* Acedido em 6 de Abril de 2024. Disponível em: https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/cbb3db75-fb1a-48b5-182e-08dc25c78130/Data

IMEX. (2024). *Timbertech® acoustic underlays.* Acedido em 6 de Agosto de 2024. Disponível em: https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/4674dcd8-aa14-436c-d9a4-08dcd13945f5/Data

Imperalum. (sem data). Imperalum Soluções com Futuro. Acedido em 1 de Outubro de 2024. Disponível em: https://www.imperalum.com/

Incropera, F. P. (2003). Iransferência le Calor e le Massa.

Instituto Nacional de Estatística. (2023). Estatísticas da Construção e Habitação-2022. https://www.ine.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=620424852&att_display=n&att_download=y

Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2024). Normais Climatológicos. Acedido em 30 de Janeiro de 2024. Disponível em: https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/

International Energy Agency. (2022). *World Energy Outlook*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1 11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf

Investwood. (sem data). Acedido em 12 de Setembro de 2024. Disponível em: https://www.investwood.pt/contactos/

Investwood. (2021). *VALBOPAN – Fibra de Madeira, S.A.* Acedido em 8 de Agosto de 2023. Disponível em: https://www.investwood.pt/wp-content/uploads/2022/02/DAP_PT_Valbopan_006_2021.pdf

Investwood. (2022). *VIROC Portugal – Indústria de Madeira e Cimento, S.A.* Acedido 6 de Abril de 2024. Disponível em: https://www.investwood.pt/wp-content/uploads/2022/11/DAP011_PT_VIROC_-Setembro_2022.pdf

ISB Groupe. (2020). *Déclaration des Performances*. Acedido em 20 de Agosto de 2024. Disponível em: https://media.adeo.com/media/2546460/

ISO. (2014). ISO 16283-1: 2014. *Acoustics—Field Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements—Part 1: Airborne Sound Insulation*.

ISO. (2020). ISO 16283-2: 2020. *Acoustics—Field Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements—Part 2: Impact Sound Insulation*.

ISO, E. 10140-2: 2021; *Acoustics—Laboratory Measurement of Sound Insulation of Building Elements—Part 2: Measurement of Airborne Sound Insulation.*

ISO, E. 1040-3: 2021; *Acoustics—Laboratory Measurement of Sound Insulation of Building Elements—Part 3: Measurement of Impact Sound Insulation.*

ISO, E. (2021). 717-1: 2020 Acoustics. *Rating of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements—Part 1: Airborne Sound Insulation (ISO 717-1: 2020). ISO: Geneva, Switzerland*.

ISO, S. 717-2: 2020 Acoustics. *Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part*, *2*.

ISO, E. (2017). 6946: 2017. *Building components and building elements-thermal resistance and thermal transmittance-calculation methods. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium*.

Isorenel. (sem data). *Celulose Projetada*. Isorenel Isolamentos Projetados. Acedido a 3 de Fevereiro de 2024. Disponível em: https://isorenel.pt/celulose-projetada/

Jelle, B. P., Hynd, A., Gustavsen, A., Arasteh, D., Goudey, H., & Hart, R. (2012). Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials and Solar Cells, 96*(1), 1–28.

Jiang, L., Xiao, H., An, W., Zhou, Y., & Sun, J. (2014). Correlation study between flammability and the width of organic thermal insulation materials for building exterior walls. *Energy and Buildings*, *82*, 243–249.

Kalamees, T. (2007). Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment*, *42*(6), 2369–2377.

Karamanos, A., Hadiarakou, S., & Papadopoulos, A. M. (2008). The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool. *Energy and Buildings*, *40*(8), 1402–1411.

Khoukhi, M., Abdelbaqi, S., Hassan, A., & Darsaleh, A. (2021). Impact of dynamic thermal conductivity change of EPS insulation on temperature variation through a wall assembly. *Case Studies in Thermal Engineering*, *25*, 100917.

Kyoung-Woo, K. I. M., & Jeong, Y. S. (2014). Experimental Study on the Comparison of the Material Properties of Glass Wool Used as Building Materials. *Materials Science*, *20*(1), 103–107.

Knauf. (sem data). Knauf Diamant 12,5. Acedido em 20 de Setembro de 2024. Disponível em: https://knauf.com/pt-PT

Knauf. (2018). *K713G.pt Knauf Cortafogo A1*. Acedido em 20 de Agosto de 2024. Disponível em: https://www.knauf.pt/

Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X. W., Sanjayan, J. G., & Memon, R. A. (2020). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 131*, 110038.

Lehmann, S. (2012). Sustainable construction for urban infill development using engineered massive wood panel systems. *Sustainability*, *4*(10), 2707–2742.

*Leroy Merlin*. (sem data). Acedido em 19 de Setembro de 2024. Disponível em: https://www.leroymerlin.pt/

Li, X., Zhang, K., Shi, R., Ma, X., Tan, L., Ji, Q., & Xia, Y. (2017). Enhanced flame-retardant properties of cellulose fibers by incorporation of acid-resistant magnesium-oxide microcapsules. *Carbohydrate Polymers*, *176*, 246–256.

Liebl, A., Späh, M., & Leistner, P. (2014). Acoustics in wooden buildings-Evaluation of acoustic quality in wooden buildings: Listening tests and questionnaire field study. https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962816/FULLTEXT01.pdf

Limited, K. (2005). *Acoustic Performance Guide*. Kingspan Limited Holywell, UK.

Liu, H., Qiu, C., Zhao, J., Li, W., Shi, J., Liu, H., & Chen, Z. (2023). Investigation on the mechanical behavior of glulam spliced joints connected with self-tapping screws and prestressed steel strips. *Construction and Building Materials*, *366*, 130190.

Liven, H., & Abrahamsen, R. (2023, Junho). Mjøstårnet: The World's tallest timber building. *World Conference on Timber Engineering.* Oslo (pp. 069179-0547).

Ljunggren, F., Simmons, C., & Hagberg, K. (2014). Correlation between sound insulation and occupants' perception - Proposal of alternative single number rating of impact sound. *Applied Acoustics*, *85*, 57–68.

LNEC, IHRU, InCI, ANACOM & APA. – Regime Excecional para a Reabilitação Urbana – Guia Prático: F. Requisitos de Eficiência Energética e Qualidade Térmica. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana, Instituto da Construção e do Imobiliário, Autoridade Nacional de Comunicações, Agência Portuguesa do Ambiente, 2014.

Lopez Hurtado, P., Rouilly, A., Vandenbossche, V., & Raynaud, C. (2016). A review on the properties of cellulose fibre insulation. *Building and Environment, 96,* 170–177.

Lourenço, P., & Branco, J. (2012). Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI. https://hdl.handle.net/1822/26503

Mancel, V., Čabalová, I., Krilek, J., Réh, R., Zachar, M., & Jurczyková, T. (2022). Fire resistance evaluation of new wooden composites containing waste rubber from automobiles. *Polymers*, *14*(20), 4465.

Maschke, C., & Niemann, H. (2007). Health effects of annoyance induced by neighbour noise. *Noise Control Engineering Journal, 55(3),* 348–356.

Matos, B. de C. (2024). Vantagens e desvantagens da madeira na construção das casas. *Visão*. Acedido em 10 de Março de 2024. Disponível em: https://visao.pt/

Matoski, A., & Ribeiro, R. S. (2016). Evaluation of the acoustic performance of a modular construction system: Case study. *Applied Acoustics*, *106*, 105–112.

Mclaren, M. (2019). The world's tallest wooden buildings. *Work Construction Network.* Acedido em 7 de Novembro de 2023. Disponível em: https://www.worldconstructionnetwork.com/features/worlds-tallest-wooden-buildings/

Metzen, H. A., & Schumacher, R. (2005). Prediction of Sound Insulation in Timber Frame Buildings. *Proceedings Forum Acusticum, Budimpešta, Madarska* (pp. 2347-2352)

Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.(2008). "Decreto-Lei n.° 96/2008". *Diário da República* 1ª série, 110 (junho): 3359–3372. https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/96-2008-449682

Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.(2007). "Decreto-Lei n.° 9/2007". *Diário da República* 1ª série: 389–398. https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/9-2007-522807

Mirski, R., Dziurka, D., & Trociński, A. (2018). Insulation properties of boards made from long hemp (Cannabis sativa L.) fibers. *BioResources, 13*(3), 6591–6599.

Miskinis, K., Dikavicius, V., Buska, A., & Banionis, K. (2018). Influence of EPS, mineral wool and plaster layers on sound and thermal insulation of a wall: A case study. *Applied Acoustics*, *137*, 62–68.

Mohammad, M., Gagnon, S., Douglas, B. K., & Podesto, L. P. (2012). Introduction to Cross Laminated Timber. *Wood Design Focus*, 22(2), 3–12.

Mooibroek, H., & Cornish, K. (2000). Alternative sources of natural rubber. *Applied microbiology and biotechnology*, *53,* 355–365.

Muellner, H., Frey, A., & Humer, C. (2008). Sound insulation properties of building elements, considering the frequency range below 100 Hz. *Journal of the Acoustical Society of America, 123*(5), 3766.

Müller, T., Borschewski, D., Albrecht, S., Leistner, P., & Späh, M. (2021). The dilemma of balancing design for impact sound with environmental performance in wood ceiling systems—a building physics perspective. *Sustainability*, *13*(16), 8715.

naturally:wood. (sem data). *Virtuoso*. Forestry Innovation Investment. Acedido em 6 de Março de 2024. Disponível em: https://www.naturallywood.com/project/virtuoso/

Naughton, A., Fan, M., & Bregulla, J. (2014). Fire resistance characterisation of hemp fibre reinforced polyester composites for use in the construction industry. *Composites Part B: Engineering*, *60*, 546–554.

Nechita, P., & Năstac, S. (2018). Foam-formed cellulose composite materials with potential applications in sound insulation. *Journal of Composite Materials, 52*(6), 747–754.

NESDE. (2005). *A gaiola como génese da construção anti-sísmica*. Acedido em 29 de Abril de 2023. Disponível em: http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/gaiol_const_sism.html

Nicolajsen, A. (2005). Thermal transmittance of a cellulose loose-fill insulation material. *Building and Environment*, *40*(7), 907–914.

Nusser, B., Lux, C., & Ferk, H. (2020, Dezembro). ETICS and Exterior Wooden Claddings on timber frame walls & influence of façade system and construction details on the airborne sound insulation. *Forum Acusticum*. (pp. 1241-1248).

Obras360. (sem data). *Isolamento Acústico Ruído Impacto Stravifloor Mat-W8a 8mm 10x1,25 Manta Ondulada*. Acedido em 16 de Março de 2024. Disponível em: https://www.obras360.pt/

Pal, R. K., Goyal, P., & Sehgal, S. (2021). Effect of cellulose fibre based insulation on thermal performance of buildings. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 5778–5781.

Papadopoulos, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, *37*(1), 77–86.

Patrício, J. (2018). *Acústica nos Edifícios (7)*. Engebook. ISBN: 978-989-723-262-6

Pedroso, M., de Brito, J., & Silvestre, J. D. (2019). Characterization of walls with eco-efficient acoustic insulation materials (traditional and innovative). *Construction and Building Materials*, *222*, 892–902.

Pedroso, M., de Brito, J., & Silvestre, J. D. (2017). Characterization of eco-efficient acoustic insulation materials (traditional and innovative). *Construction and Building Materials*, *140*, 221–228.

Pereira, H. (2015). The Rationale behind Cork Properties: A Review of Structure and Chemistry. *BioResources*, *10*(3), 6207–6229.

Pihelo, P., & Kalamees, T. (2016). The effect of thermal transmittance of building envelope and material selection of wind barrier on moisture safety of timber frame exterior wall. *Journal of Building Engineering*, *6*, 29–38.

Presidência do Conselho de Ministros (2020). "Decreto-Lei n.º 101-D/2020". *Diário da República* 1ª série, 237 (dezembro). https://files.dre.pt/1s/2020/12/23701/0002100045.pdf

Quirt, J. D., King, F., Nightingale T. R. T., & Craig, B. (2006). *Guide for Sound Insulation in Wood Frame Construction*. Institute for Research in Construction, National Research Council Canada.

Ramos, L. (2022). *César Cardoso: "Construir em cânhamo é uma verdadeira alternativa verde"*. Acedido em 29 de Março de 2023. Disponível em: https://cannareporter.eu/2022/11/12/cesar-cardoso-construir-em-canhamo-e-uma-verdadeira-alternativa-verde/

Rasmussen, B. (2019). Sound insulation between dwellings-Comparison of national requirements in Europe and interaction with acoustic classification schemes. *23rd International Congress on Acoustics*. (pp. 5102-5109). Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA eV).

Reculusa, S., Trinquecoste, M., Dariol, L., & Delhaès, P. (2006). Formation of low-density carbon materials through thermal degradation of a cork-based composite. *Carbon, 44*(7), 1316–1320.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019. RNC 2050 – Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050: Estratégia de Longo Prazo para a Neutralidade Carbónica da Economia Portuguesa em 250. *Diário da República* 1ª série, 123 (julho): 3208–3299.

Rodríguez-Soria, B., Domínguez-Hernández, J., Pérez-Bella, J. M., & Del Coz-Díaz, J. J. (2014). Review of international regulations governing the thermal insulation requirements of residential buildings and the harmonization of envelope energy loss. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 34,* 78–90.

Sagartzazu, X., Hervella-Nieto, L., & Pagalday, J. M. (2008). Review in sound absorbing materials. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *15*(3), 311–342.

Santos, P., Correia, J. R., Godinho, L., Dias, A. M. P. G., & Dias, A. (2019). Bonding quality assessment of cross-layered Maritime pine elements glued with one-component polyurethane adhesive. *Construction and Building Materials*, *211*, 571–582.

Santos, P., Sousa, L., Godinho, L., Correia, J. R., & Dias, A. M. P. G. (2021). Acoustic and thermal behaviour of cross-insulated timber panels. *Journal of Building Engineering*, *44*, 103309.

Sastre, R. S. (2000). *Propietats dels materials i elements de construcció* (Vol. 29). Univ. Politèc. de Catalunya.

Scamoni, F., Scrosati, C., Depalma, M., Danza, L., Bellazzi, A., & Gandolfi, R. (2021, Julho). Sound insulation improvement of a façade with external thermal insulation system. *Proceedings of the 27th International Congress on Sound and Vibration, ICSV, Virtual* (pp. 11-16)

Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *62*, 988–1011.

Schmidt, A. C., Jensen, A. A., Clausen, A. U., Kamstrup, O., & Postlethwaite, D. (2004). A comparative life cycle assessment of building Insulation products made of stone wool, paper wool and flax: part 1: background, goal and scope, life cycle inventory, impact assessment and interpretation. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 9*, 53–66.

Schoenwald, S., Zeitler, B., Sabourin, I., & King, F. (2013). Sound insulation performance of cross laminated timber building systems. *INTER-NOISE and NOISE-COM congress and conference proceedings* (Vol. 247, No. 3, pp. 4337-4346). Institute of Noise Control Engineering.

Schulte, M., Lewandowski, I., Pude, R., & Wagner, M. (2021). Comparative life cycle assessment of bio-based insulation materials: Environmental and economic performances. *GCB Bioenergy*, *13*(6), 979–998.

Secil TEK. (2024). *Redur branco exterior*. Acedido em 9 de Outubro de 2024. Disponível em: https://www.secil.pt/

Sierra-Pérez, J., Boschmonart-Rives, J., Dias, A. C., & Gabarrell, X. (2016). Environmental implications of the use of agglomerated cork as thermal insulation in buildings. *Journal of Cleaner Production*, *126*, 97–107.

Sikkema, R., Styles, D., Jonsson, R., Tobin, B., & Byrne, K. A. (2023). A market inventory of construction wood for residential building in Europe – in the light of the Green Deal and new circular economy ambitions. *Sustainable cities and society*, *90*, 104370.

Silva, C. V., Branco, J. M., & Lourenço, P. B. (2012). MLCC na construção em altura. https://hdl.handle.net/1822/22216

Silvestre, J., Castelo, A., Silva, J., Brito, J., & Pinheiro, M. (2022). Reabilitação energética da envolvente de edifícios: desempenho económico, energético e ambiental de ETICS com ICB ou EPS. *Engenharia Civil UM, 2022*(62), 18–32.

Sjostrom, J., & Jansson, R. (2012, Julho). Measuring thermal material properties for structural fire engineering. *15th International Conference on Experimental Mechanics* (Vol. 2846, pp. 22–27).

Soares, J. P. (2024). *Dossier Técnico*. Acedido em 23 de Março de 2024. Disponível em: www.investwood.pt

Soprema Italia. (2022). *Pannelli in EPS*. Acedido em 10 de Agosto de 2023. Disponível em: https://www.soprema.it/files/epd-eps-s-p-07844_b3b6d54723b5b438478560341608bf38.pdf

Sorensen, J. (2019). *Virtuoso blazes trail for CLT mid-rise construction*. Acedido em 6 de Março de 2024. Disponível em: https://canada.constructconnect.com/joc/news/technology/2019/05/virtuoso-blazes-trail-clt-mid-rise-construction

Sotayo, A., Bradley, D., Bather, M., Sareh, P., Oudjene, M., El-Houjeyri, I., Harte, A. M., Mehra, S., O'Ceallaigh, C., Haller, P., Namari, S., Makradi, A., Belouettar, S., Bouhala, L., Deneufbourg, F., & Guan,

Z. (2020). Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. *Developments in the Built Environment*, *1*, 100004.

Strandberg-de Bruijn, P., Donarelli, A., & Balksten, K. (2019). Full-scale studies of improving energy performance by renovating historic Swedish timber buildings with hemp-lime. *Applied Sciences*, *9*(12), 2484.

Sun, L., Xie, Y., Ou, R., Guo, C., Hao, X., Wu, Q., & Wang, Q. (2020). The influence of double-layered distribution of fire retardants on the fire retardancy and mechanical properties of wood fiber polypropylene composites. *Construction and Building Materials*, *242*, 118047.

Svatoš-Ražnjević, H., Orozco, L., & Menges, A. (2022). Advanced timber construction industry: A review of 350 multi-storey timber projects from 2000-2021. *Buildings*, *12*(4), 404.

Tenório, M. C. U. (2022). *Sistema construtivo em painéis modulares para edifícios coletivos com estrutura de madeira* [Dissertação de Mestrado Construção e Reabilitação Sustentáveis, Universidade do Minho(Portugal)]. https://hdl.handle.net/1822/81425

Termolan Isolamentos Termo-Acústicos (sem data). Acedido em 12 de Setembro de 2024. Disponível em: https://termolan.pt/

Termolan.(2024). *Termolan-Isolamentos Acústicos, S.A.* Acedido em 6 de Abril de 2024. Disponível em: https://termolan.pt/wp-content/uploads/2024/12/dap_pt_termolan_prolongamento-4-2024.pdf

Termolan. (2019). *Termolan-Isolamentos Acústicos, S.A.* Acedido em 4 de Fevereiro de 2024. Disponível em: https://termolan.pt/produtos/dap-declaracao-ambiental-de-produto/

The Navigator Company. (2022). *Falta de Madeira em Portugal: aumentar a produtividade é prioridade*. Acedido em 1 de Novembro de 2023. Disponível em: https://florestas.pt/valorizar/falta-de-madeira-em-portugal-aumentar-produtividade-e-prioridade/

Tiuc, A. E., Nemeş, O., Vermeşan, H., & Toma, A. C. (2019). New sound absorbent composite materials based on sawdust and polyurethane foam. *Composites Part B: Engineering*, *165*, 120–130.

Tobriner, S. (2001). Compreender a importância da Gaiola Pombalina, o sistema anti-sísmico mais avançado do século XVIII. *Pedra & Cal, 3*(11), 13–14.

Tonelli, C., & Grimaudo, M. (2014). Timber buildings and thermal inertia: Open scientific problems for summer behavior in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, *83*, 89–95.

Troppová, E., Švehlík, M., Tippner, J., & Wimmer, R. (2015). Influence of temperature and moisture content on the thermal conductivity of wood-based fibreboards. *Materials and Structures*, *48*, 4077–4083.

Vairetti, G., Hartman, A., Pol, Y., & De Krom, D. (2021). Sound insulation performance of CLT prefabricated modules for high-rise buildings. https://documentacion.sea-acustica.es/publicaciones/Madeira21/ID182.pdf

Vardaxis, N. G., Bard Hagberg, D., & Dahlström, J. (2022). Evaluating laboratory measurements for sound insulation of cross-laminated timber (CLT) Floors: Configurations in Lightweight Buildings. *Applied Sciences*, *12*(15), 7642.

Visionarium. (2013). *Como se fabrica borracha natural e sintética?* [Vídeo]. RTP Ensina. https://ensina.rtp.pt/artigo/visiokids-como-e-feita-a-borracha/

Volcalis. (sem data). Acedido em 12 de Setembro de 2024. Disponível em: https://volcalis.pt/

Volcalis. (2022). *Volcalis-Isolamentos Minerais, S.A.* Acedido 8 de Agosto de 2023. Disponível em: https://daphabitat.pt/assets/Uploads/dap/pdfs/2f1efaedef/DAP-010_2022_Volcalis_NaoRevestida_PT.pdf

Wang, L., Chen, S. S., Tsang, D. C. W., Poon, C. S., & Shih, K. (2016). Value-added recycling of construction waste wood into noise and thermal insulating cement-bonded particleboards. *Construction and Building Materials*, *125*, 316–325.

Wang, S., Huang, X., Chen, H., Liu, N., & Rein, G. (2015). Ignition of low-density expandable polystyrene foam by a hot particle. *Combustion and Flame*, *162*(11), 4112–4118.

Wang, Y., Zhang, S., Wang, D., & Liu, Y. (2022). Experimental study on the influence of temperature and humidity on the thermal conductivity of building insulation materials. *Energy and Built Environment, 4*(4), 386–398.

Ward, R. (2009). Going to New Heights. *STRUCTURE magazine*. Acedido em 9 de Novembro de 2023. Disponível em: https://www.structuremag.org/

Waugh, A., Wells, M., & Lindegar, M. (2010). Tall timber buildings: Application of solid timber constructions in multi-storey buildings. *International convention of society of wood science and technology and United Nations economic commission for Europe*.

Wells, M. (2011). Tall Timber Buildings: Applications of Solid Timber Construction in Multistory Buildings. *CTBUH Journal,* 24–27.

whywood. (sem data). *Mjøstårnet / Voll Arkitekter*. whywood. Acedido em 8 de Março de 2024. Disponível em: https://why-wood.com/noticias/mjostarnet-voll-arkitekter/

Yang, Y., Fenemore, C., Kingan, M. J., & Mace, B. R. (2021). Analysis of the vibroacoustic characteristics of cross laminated timber panels using a wave and finite element method. *Journal of Sound and Vibration*, *494*, 115842.

Yuya, N., Quang, N. H., Sohei, N., Tsuyoshi, N., & Takashi, Y. (2010). The acoustic design of soundproofing doors and windows. *The Open Acoustics Journal, 3*(1).

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*, *49*, 246–253.

Zhang, B., Rasmussen, B., Jorissen, A., & Harte, A. (2013). Comparison of vibrational comfort assessment criteria for design of timber floors among the European countries. *Engineering Structures*, *52*, 592–607.

Zhao, J. R., Zheng, R., Tang, J., Sun, H. J., & Wang, J. (2022). A mini-review on building insulation materials from perspective of plastic pollution: Current issues and natural fibres as a possible solution. *Journal of Hazardous Materials*, *438*, 129449.

Zhao, X. (2017). *Intr*oduction to EPS and XPS two exterior Insulation used. *Advances in Materials, Machinery, Electrical Engineering (AMMEE 2017)* (pp. 72–74). Atlantis Press.

Zhou, S. C., Chu, F. Z., Lv, X. H., & Xiao, Y. (2022). Experimental studies on glubam columns under axial compression. *Journal of Building Engineering*, *49*,103453.

# Anexos

## Anexo 1

Tabela A 1 – Soluções Construtivas de paredes (adaptado de (Dataholz.Eu, 2024; Metzen et al., 2005; Dos Santos et al., 2006))

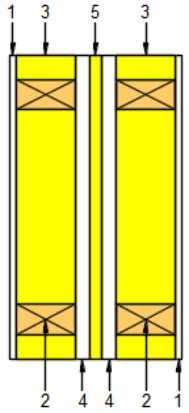
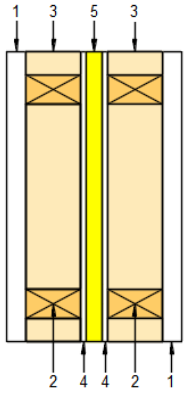
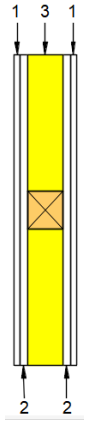
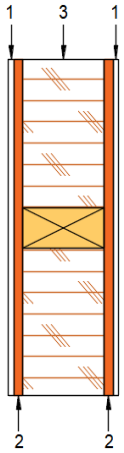
| Parede | Camadas (mm) | U (W/m². ° C) | Rw (C, Ctr) (dB) |
|---|---|---|---|
|  | 1 – Placa de gesso cartonado (12,5)<br>2 – Estrutura de madeira (100)<br>3 – Lã mineral (100)<br>4 – 2 Placas de gesso cartonado (25)<br>5 – Lã Mineral (20) | 0,19<br>(parede meeira) | 58<br>(-3;-11) |
|  | 1 – Placa de gesso cartonado (36)<br>2 – Estrutura de madeira (100)<br>3 – Painel de fibras de madeira (100)<br>4 – Placas de gesso cartonado (12,5)<br>5 – Lã mineral (30) | 0,17<br>(parede meeira) | 61<br>(-2;-9) |

Tabela A 1 – Soluções Construtivas de paredes (adaptado de (Dataholz.Eu, 2024; Metzen et al., 2005; Dos Santos et al., 2006)) (concl.)

| Parede | Camadas (mm) | U (W/m².°C) | Rw (C, Ctr) (dB) |
|---|---|---|---|
|  | 1 – Placa de gesso cartonado (10)<br>2 – Placa de gesso cartonado (12,5)<br>3 – Barrotes de madeira (60X60 mm²) isolados com lã de rocha (60)<br><br>**Nota**: Colocação de barrotes de madeira (60/60 mm²) com distância de 625 mm entre eles. | 0,59<br>(parede meeira)<br><br>-<br><br>0,62<br>(parede exterior) | 47<br>(-2; -5) |
|  | 1 – Placa de gesso cartonado (10)<br>2 – Placa OSB (15)<br>3 – Barrotes de madeira (140X60 mm²) isolados com aglomerado de cortiça expandida (140)<br><br>**Nota**: Colocação de barrotes de madeira (140/60 mm²) com distância de 625 mm entre eles. | 0,31<br>(parede meeira)<br><br>-<br><br>0,32<br>(parede exterior) | 47<br>(-2; -6) |

## Anexo 2

Tabela A 2 – Soluções construtivas de lajes (adaptado de (Vardaxise et al., 2022; IBERA Indústria de betão, 2017; Dos Santos et al.,2006))

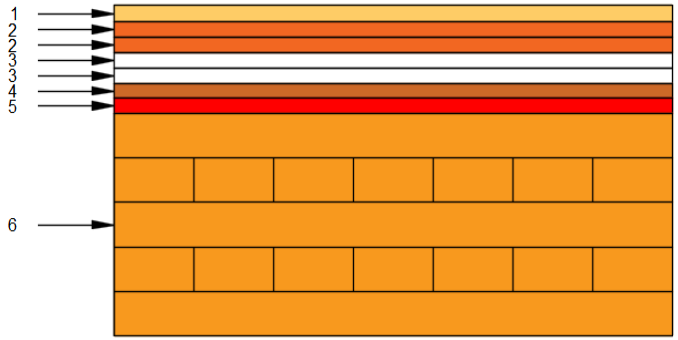
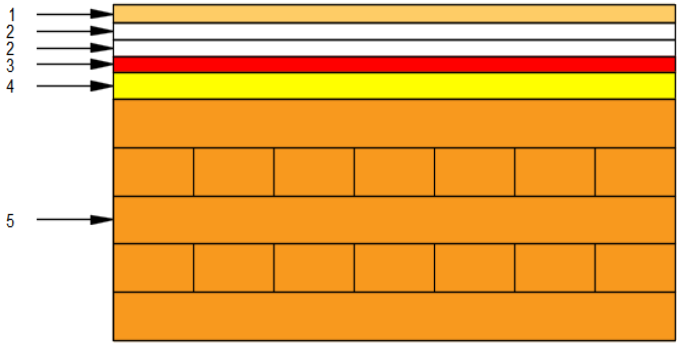
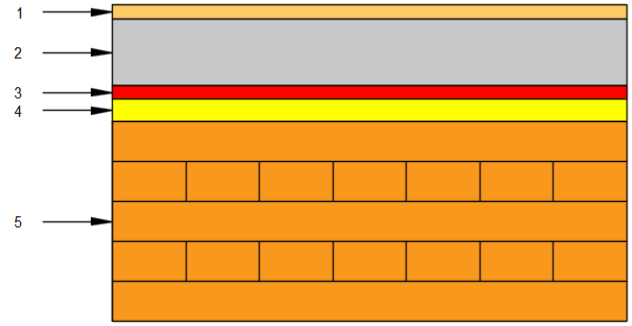
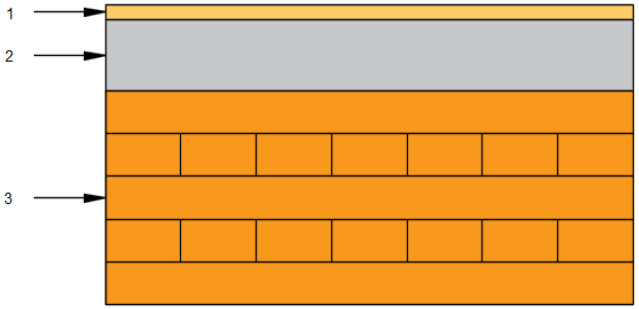
| Laje | Constituição da parede (mm) | U (W/m². ° C) | Ln, w (dB) | Rw (dB) |
|---|---|---|---|---|
|  | 1 – *Parquet* (13)<br>2 – Placa de contraplacado (12,5)<br>3 – Placa de gesso cartonado (12,5)<br>4 – Camada resiliente A (12)<br>5 – Camada resiliente B (12)<br>6 – CLT (180) | 0,54<br>(fluxo descendente)<br>-<br>0,59<br>(fluxo ascendente) | 60 | 50 |
|  | 1 – *Parquet* (13)<br>2 – Placa de gesso cartonado (12,5)<br>3 – Camada resiliente B (12)<br>4 – Lã de vidro (20)<br>5 – CLT (180) | 0,48<br>(fluxo descendente)<br>-<br>0,52<br>(fluxo ascendente) | 59 | 50 |

Tabela A 2 – Soluções construtivas de lajes (adaptado de (Vardaxis, Hagberg & Dahlström, 2022; IBERA Indústria de betão, 2017; Dos Santos et al.,2006)) (concl.)

| Laje | Constituição da parede (mm) | U (W/m². ° C) | Ln, w (dB) | Rw (dB) |
|---|---|---|---|---|
|  | 1 – *Parquet* (13)<br>2 – Betonilha (60)<br>3 – Camada resiliente B (12)<br>4 – Lã de vidro (20)<br>5 – CLT (180) | 0,49<br>(fluxo descendente)<br>-<br>0,53<br>(fluxo ascendente) | 54 | 54 |
|  | 1 – *Parquet* (13)<br>2 – Betonilha (60)<br>3 – CLT (180) | 0,69<br>(fluxo descendente)<br>-<br>0,76<br>(fluxo ascendente) | 66 | 45 |
| Nota: A nomeação diferenciada entre as camadas resilientes é feita com base na sua base volúmica tendo o A 359,8 Kg/m³ e o B 340,2 Kg/m³. Em ambos os materiais foi considerada a condutibilidade térmica da borracha. No caso da lã de vidro foi usada a condutibilidade de uma lã de vidro com valores de densidade entre 15-100 Kg/m³. | | | | |

## Anexo 3

Tabela A 3 – Edifícios em madeira lamelada cruzada (CLT): sete casos internacionais de edifícios residenciais com mais de três andares (adaptado de (Lehmann, 2012))

| Caso | Altura | Fogos | Custo (milhões) | Arquitetos | Comentários |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.Bridport House Hackney, Londres, RU (concluído em outubro de 2011) | 8 andares | 41 unidades (apartamentos com 1-4 quartos) | £ 5,9 (€ 6,8)[a] | Karakusevic & Carson, London com E£urban, Stotra Enso | Tempo de construção: 12 semanas, out.-nov. 2010. CLT entregue por Stora Enso (30 entregas no local) |
| 2.Stadthaus, edifício residencial, 24 Murray Grove, Hackney, Londres, RU (concluído em janeiro de 2009) | 9 andares, sendo 8 em CLT | 29 apartamentos, parcialmente de habitação social | £ 3,5 (€ 4,0)[a] | Waugh & Thistleton Architects com Techniker Limited Engineers | CLT da KLH usada: 926 $m^3$ em paredes CLT, lajes de piso, escadas de madeira e núcleos de elevação. Cada apartamento tem a sua varanda. Estrutura de madeira montada por 4 carpinteiros em 12 semanas com 1 andar a cada 3 dias, tempo total de construção de 49 semanas. |
| 3.Svartlamoen, edifício residencial, Trondheim, Noruega Construído em 2004-05 | 5 andares em CLT, medindo 6 x 22 no plano | 2 edifícios com uma área de 1080 $m^2$. Quatro andares com unidades de 120 $m^2$ | € 2,16 | Brendeland & Kristoffersen Architects, Trondheim | Contém unidades comerciais no piso térreo. Revestido com lariço norueguês. Superfícies não tratadas de suporte ficam expostas por dentro. Quatro trabalhadores montaram a estrutura principal em 10 dias úteis. Habitação pública, com apartamentos ocupados principalmente por estudantes. |
| 4.Am Muehlweg projeto de alojamento, 1210 Vienna-Floridsdorf, Áustria (novo distrito construído em CLT, múltiplos arquitetos) Construído em 2005-06 | 3 e 4 andares em CLT com um porão em betão | 70 apartamentos em edifício CLT, 200 residentes com total aproximado de 7000 $m^2$ | € 11 | Hubert Riess, Dietrich Untertrifalle, e Hermann & Johannes Kaufmann, Schwarzach, Vorarlberg, Áustria | Três locais conectados com exploração ideal de recursos ecológicos e benefícios económicos da construção em madeira e mista de casas geminadas e em forma de L com um pátio interno, oferecendo uma área livre para uso comum. Edifício com baixos consumos energéticos padrão de acordo com BBS - prestação de 30 $kW/m^2/Pa$ (Passive Haus Standard), 'Casa passivas de madeira'. |
| a – Taxa de câmbio de libra para euro em 7/10/2023 | | | | | |

Tabela A 3 – Edifícios em madeira lamelada cruzada (CLT): sete casos internacionais de edifícios residenciais com mais de três andares (adaptado de (Lehmann, 2012)) (conc.)

| Caso | Altura | Fogos | Custo (milhões) | Arquitetos | Comentários |
|---|---|---|---|---|---|
| 5.Wagramer-strasse, canto Eipeldauer Strasse, Vienna, Austria, 2012-5. Wagramer-strasse, canto Eipeldauer Strasse, Vienna, Áustria, 2012-13 | 6 andares para o edifício principal e 3 complementares de 3 andares em painéis CLT, acima de uma base em betão | 101 unidades (habitação pública), construída em apenas 10 semanas | € 14 | Michael Schluder com Hagmueller Architekten, Viena | O resultado de uma competição de projetos, a cidade de Viena está a promover um programa chamado 'Madeira na cidade' com habitação pública de qualidade. A iniciativa foca edifícios de madeira entre 3-8 andares no centro da cidade. O edifício mais alto em madeira da Áustria tem 7 andares (6 em CLT assentes num em betão); construção híbrida com escadas em betão. Foram fabricados pela Binderholz e utilizados um total de 2400 $m^3$ (19500 $m^2$) de painéis CLT, sendo que os painéis armazenam aproximadamente 2400 toneladas de $CO_2$. |
| 6.'e3' edifício residencial, 3 Esmarchstrasse, Berlim Prenzlauer Berg, Alemanha, 2008 (completo em abril 2008 | 7 andares em zona urbana (23 m) | 7 apartamentos (um apartamento por andar) | € 2,5 (cerca de €2100 $m^2$) | Kaden & Klingbeil Architekten, Berlim | Os regulamentos alemães mudaram em 2002, permitindo a construção em madeira (estrutura híbrida, usando CLT e Glulam) até 5 andares. Este edifício de 7 andares foi desenvolvido com colaboração com o Departamento de Bombeiros de Berlim; a escada de evacuação em betão é separada do edifício principal. Edifício 40% mais leve em comparação com um em betão, funciona com 27 kWh/$m^2$/a. Edifício neutro em $CO_2$. |
| 7.Holzhausen edifício residencial, Steinhausen, CH, 2006 | 6 andares - 4 andares em painel CLT, base em betão | 12 unidades (dois apartamentos por andar, com 150 e 166 $m^2$) | € 4 | Scheitlin, Syfrig & Partner Architekten, Luzern | Primeiro edifício de madeira com 6 andares na Suíça; proteção padrão contra incêndio da Suíça, 60 minutos de capacidade de resistência ao fogo. |
| a – Taxa de câmbio de libra para euro em 7/10/2023 | | | | | |

## Anexo 4

Tabela A 4 – Primeiro edifício de múltiplos apartamentos e andares da Austrália (adaptado de (Lehmann, 2012))

| Caso | Altura | Fogos | Custo (milhões) | Arquitetos | Comentários |
|---|---|---|---|---|---|
| 8.'Forté', 807 Bourke Street, Victoria Harbour; Melbourne, Victoria, Australia,2012 | 10 andares residenciais (32,17 m de altura) 9 andares em CLT assentes em base em betão | 23 apartamentos e comércio no piso térreo equipado com aspersores; sem local de estacionamento | AUS$11 (€6,6) [a] | Lend Lease (Austrália) | Primeiro prédio realizado em madeira CLT na Austrália. Painéis CLT fabricados e importados da KLH, Áustria. Trabalhos iniciaram em fevereiro e concluído em outubro de 2012. Forté inclui 7 apartamentos com 1 quarto (59 $m^2$), 14 apartamentos com 2 quartos (80 $m^2$) e 2 apartamentos na cobertura com 2 quartos (102 $m^2$). |
| a – Taxa de câmbio de dólar australiano para euro em 7/10/2023 | | | | | |

## Anexo 5

Tabela A 5 – Desempenho térmico e acústico de alguns materiais absorventes analisados em soluções construtivas em parede ou lajes de madeira (Evola et al., 2019; Chang et al., 2021; Fu et al., 2020; Gil, 2007; Strandberg-de Bruijn et al., 2019; Nicolajsen, 2005; Georgescu et al., 2022; Soares, 2024; Muellner et al., 2008; Balmori et al., 2024)

| Material | Desempenho Térmico | Desempenho Acústico |
|---|---|---|
| EPS | Apresenta bom comportamento a nível de isolamento térmico em estruturas de madeira | Não apresentam bom desempenho no que diz respeito ao isolamento sonoro. |
| XPS | Tem boa aplicação em estruturas de madeira para os diferentes climas devido a boa resistência à humidade. | |
| Lã de Rocha | Tem bom comportamento em relação ao isolamento térmico em estruturas de madeira. | Estudos em que é usada lão mineral (lã de vidro ou lã de rocha) em edifício de madeira mostram bons resultados a nível do isolamento sonoro. |
| Lã de Vidro | | |
| Cortiça | Bom comportamento em estruturas de madeira, sendo a sua prestação boa em paredes exteriores graças à sua boa resistência à humidade. | É um material com boas características em relação ao desempenho acústico, não existe muita informação em relação à sua incorporação em soluções construtivas de madeira. |
| Fibra de Madeira | O comportamento foi similar ao EPS tendo em conta estudos efetuados. É necessário, no entanto o tratamento para melhorar o comportamento na presença de água, fungos e fogo. | Não existem muitos estudos no que toca à sua aplicação em edifícios de madeira. |
| Borracha | Não é relevante o seu desempenho térmico em edifícios de madeira. | Revela bom comportamento quando utilizado com outros materiais absorventes como celulose e fibras de madeira, necessitando de mais investigação. |
| Painel compósito de cimento e partículas de madeira | Sem estudos relevantes no que toca à sua prestação em estruturas de madeira. | Bom isolamento acústico em soluções construtivas de madeira, sendo necessário o uso em conjugação com materiais absorventes como, p.e., lã de rocha. |
| Cânhamo | Poucos estudos foram realizados, sendo de destacar o uso de cal que apresentou resultados satisfatórios. | Necessita de mais investigação, em relação à sua possível incorporação com outros materiais como borracha. |
| Celulose | Apresenta um desempenho térmico inferior ao da lã mineral, tendo menor resistência à humidade | |
| Lã de Ovelha | Bom comportamento térmico em construções de madeira. É necessário, no entanto, o mesmo tratamento aconselhado para as fibras de madeira. | Não foram encontrados estudos relevantes em que seja usado como isolamento em estruturas de madeira. |

## Anexo 6

Tabela A 6 Preços dos materiais absorventes em função do isolamento e elemento construtivo (CYPE Ingenieros, 2023)

| Material | Isolamento | Aplicação | Espessura | Características | Preço (€/m²) |
|---|---|---|---|---|---|
| EPS | Térmico | Sistema ETICS | 50 | R = 1,32 m²°C/W<br>λ = 0,038 W/(m°C) | 3,84 |
| | | Pavimento Flutuante | | R = 1,65 m²°C/W<br>λ = 0,029 W/(m°C) | 4,04 |
| | | Sob Laje | | R = 1,70 m²°C/W<br>λ = 0,029 W/(m°C) | 8,81 |
| | Termo Acústico | Pavimento Flutuante ou de Madeira e Laminados | | R = 1,65 m²°C/W<br>λ = 0,029 W/(m°C) | 7,75 |
| | Acústico (aéreo e percussão) | Pavimento Flutuante | 30 | R = 1,00 m²°C/W<br>λ = 0,030 W/(m°C) | 4,68 |
| | | Pavimento de Madeira e Laminados | 40 | R = 1,20 m²°C/W<br>λ = 0,033 W/(m°C) | 9,78 |
| XPS | Térmico | Sistema ETICS | 50 | R = 1,20 m²°C/W<br>λ = 0,034 W/(m°C) | 9,03 |
| | | Pavimento Flutuante | | R = 1,50 m²°C/W<br>λ = 0,033 W/(m°C) | 9,81 |
| Lã de Rocha | Térmico | Fachadas e Paredes Meeiras (entre montantes) | 50 | R = 1,40 m²°C/W<br>λ = 0,035 W/(m°C) | 4,70 |
| | | Sistema ETICS (painel de dupla densidade) | | R = 1,35 m²°C/W<br>λ = 0,035 W/(m°C) | 21,36 |
| | | Sob Laje | | R = 1,25 m²°C/W<br>λ = 0,039 W/(m°C) | 26,25 |
| | Termo Acústico | Pavimento Flutuante | | R = 1,55 m²°C/W<br>λ = 0,038 W/(m°C) | 28,66 |
| | | Pavimentos de Madeiras e Laminados | 22 | R = 0,55 m²°C/W<br>λ = 0,039 W/(m°C) | 12,90 |

Tabela A 6 Preços dos materiais absorventes em função do isolamento e elemento construtivo (CYPE Ingenieros, 2023) (conc.)

| Material | Isolamento | Aplicação | Espessura | Características | Preço (€/m²) |
|---|---|---|---|---|---|
| Lã de Rocha | Acústico (aéreos) | Divisões (entre placas)<br>Teto Falso | 50 | R = 1,50 m²°C/W<br>λ = 0,033 W/(m°C) | 8,99 |
| | Acústico (percussão) | Pavimento Flutuante | 30 | R = 0,80 m²°C/W<br>λ = 0,036 W/(m°C) | 9,95 |
| Lã de Vidro | Térmico | Sistema ETICS | 40 | R = 1,15 m²°C/W<br>λ = 0,034 W/(m°C) | 9,85 |
| | Termo Acústico | Pavimento Flutuante | 20 | R = 0,60 m²°C/W<br>λ = 0,033 W/(m°C) | 8,11 |
| Aglomerado de Cortiça Expandida | Térmico | Sistema ETICS | 50 | R = 1,25 m²°C/W<br>λ = 0,040 W/(m°C) | 15,74 |
| | | Isolamento sob laje ou entre ripas de laje | | | |
| | Acústico (aéreos) | Teto Falso | | | |
| Painel de Fibras de Madeira | Térmico | Fachadas e Paredes Meeiras | 50 | R = 1,27 m²°C/W<br>λ = 0,039 W/(m°C | 6,74 |
| | | Sistema ETICS | 40 | R = 1,03 m²°C/W<br>λ = 0,039 W/(m°C | 15,38 |
| | | Pavimento Flutuante<br>(sistema de piso radiante) | | R = 1,05 m²°C/W<br>λ = 0,039 W/(m°C | 10,69 |
| | | Teto Falso | 50 | R = 1,27 m²°C/W<br>λ = 0,039 W/(m°C | 6,74 |
| Celulose | Térmico | Fachada e Paredes Meeiras (enchimento por insuflação) | 80<br>(preenche caixa de ar) | λ = 0,040 W/(m°C | 1,36 |
| | | Laje<br>(enchimento por insuflação) | | | |
| Impactodan | Acústica<br>(aéreo e percussão) | Pavimento Flutuante ou de Madeira e Laminados | 5 | R = 0,135 m²°C/W<br>λ = 0,037 W/(m°C | 2,07 |
| | | | 10 | R = 0,26 m²°C/W<br>λ = 0,038 W/(m°C | 3,33 |
| MAD | Acústica (aéreo) | Revestimentos Interiores | 2 | $R_w$ = 36,4 dB | 3,81 |
| | | | 4 | $R_w$ = 38,5 dB | 5,72 |
| | | | 6 | $R_w$ = 56,4 dB | 10,01 |

## Anexo 7

Tabela A 7 – Matéria-Prima e unidade de produção dos materiais absorventes (adaptado de (De Sousa, 2010; Danosa, sem data.; EPS – Empresa de Poliestireno Expandido, sem data.; Fibran Energy Shield, sem data.; Termolan Isolamentos Termo – Acústicos, sem data.; Volcalis, sem data.; Amorim, sem data.; Investwood, sem data; Visionarium, 2013 ))

| Material | Matéria-Prima | Localização de unidade fabril |
|---|---|---|
| EPS | Petróleo | Felgueiras (Porto) |
| XPS | | Ovar (Aveiro) |
| Lã de Rocha | Rochas vulcânicas | Vila das Aves (Porto) |
| Lã de Vidro | Areia e vidro | Oliveira do Bairro (Aveiro) |
| Cortiça | Sobreiro | Coruche (Santarém) |
| Fibra de Madeira | Árvores, resíduos da indústria da madeira | Nazaré (Leiria) |
| Borracha | Árvore da borracha, derivados do petróleo | * |
| Painel compósito de cimento e partículas de madeira | Cimento e aglomerado de madeira | Setúbal (Setúbal) |
| Cânhamo | Cannabis sativa | Ourique (Beja) [em construção] |
| Celulose | Papel | * |
| Lã de Ovelha | Fibras de lã de ovelha | * |
| Impactodan | Espuma de polietileno reticulado | Fontanar (Guadalajara) em Espanha |
| Mad | Betume, minerais e polietileno | |
| * Materiais produzidos em Portugal, no entanto não é efetuada a sua transformação em placas para isolamento de edifícios. | | |

## Anexo 8

Tabela A 8 – Impactes ambientais dos materiais na fase de produção (categoria A1-A3) do berço ao portão por kg de material (adaptado de (( Soprema Italia, 2022; Danosa, 2016; Termolan, 2024; Volcalis, 2022; Corticeira Amorim, 2016; Investwood, 2021; IMEX, 2024; Investwood, 2022; Ekolution AB, 2020; IGI, 2024; Danosa, 2020a; Danosa, 2020b))

| Material | GWP (kg $CO_2$ eq) | ADP (kg Sb eq) | AP (kg $SO_2$ eq) | EP (kg $(PO4)^{3-}$ eq) | ODP (kg CFC 11 eq) | POCP (kg $C_2H_4$ eq) | PERT (MJ eq) | PENRT (MJ eq) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EPS | 2,84E+00 | 1,75E-07 | a | a | 1,25E-07 | a | 1,16E+00 | 8,10E+01 |
| XPS | 2,33E+00 | 1,16E-06 | 9,28E-03 | 1,23E-03 | 7,73E-08 | a | 2,12E+00 | 5,07E+01 |
| Lã de Rocha | 1,31E+00 | 3,96E-08 | 3,65E-03 | 3,65E-04 | 6,87E-08 | 2,61E-04 | 1,14E+00 | 1,36E+01 |
| Lã de Vidro | 1,39E+00 | 2,59E-06 | 7,25E-03 | 1,52E-03 | 9,81E-08 | 3,27E-04 | 8,19E+00 | 1,94E+01 |
| Cortiça[b] (ICB) | -1,72E+00 | 6,30E-07 | 1,00E-02 | 3,19E-03 | 5,92E-08 | 5,49E-04 | 8,42E+00 | 8,10E+00 |
| Painel Fibra de Madeira(Valchromat®) | 1,25E+00[c] | 1,97E-07 | 1,04E-02 | 1,01E-03 | 1,41E-07 | 6,36E-04 | 1,95E+00 | 2,53E+01 |
| Painel Fibra de Madeira (Valchromat® Ignífugo) | 1,87E+00[d] | 1,13E-06 | 1,45E-02 | 2,51E-03 | 2,08E-07 | 9,81E-04 | 2,50E+00 | 3,72E+01 |
| Borracha | 8,54E-01 | 1,51E-04 | a | a | 2,11E-07 | a | 1,28E+00 | 2,36E+01 |
| Painel compósito de cimento e partículas de madeira | 6,52E-01 | 2,57E-08 | 1,69E-03 | 2,04E-02 | 4,79E-08 | 8,07E-05 | 7,48E-01 | 6,08E+00 |
| Cânhamo | -6,34E-01 | 1,61E-06 | 1,19E-03 | 1,11E-03 | 2,44E-10 | 6,17E-05 | 1,37E+01 | 1,29E+01 |
| Celulose | 9,79E-02 | 2,43E-08 | a | a | 4,32E-10 | a | 9,89E-01 | 2,61E+00 |
| Lã de Ovelha | a | a | a | a | a | a | a | a |
| IMPACTODAN 5 | 3,06E+01 | 8,18E-07 | 6,88E-01 | 5,84E-02 | 5,19E-06 | a | 6,38E+00 | 5,25E+02 |
| MAD 4 (por $m^2$) | 3,84E-01 | 6,10E-07 | 2,14E-03 | 2,82E-04 | 2,22E-07 | a | 8,03E+00 | 2,11E+01 |

a – Informação não encontrada.
b – DAP válida até 5/10/2021.
c – Valor para aquecimento global antropogénico (A1-A3) por painel, se for considerado o carbono biogénico obtém-se um balanço de carbono –0,77E+00 Kg $CO_2$ eq/kg painel.
d – Valor para aquecimento global antropogénico (A1-A3) por painel, se for considerado o carbono biogénico obtém-se um balanço de carbono -0,13 Kg $CO_2$ eq/kg painel.

Anexo 9

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

# Catálogo de Materiais

Outubro de 2024

Lã de Rocha

Lã de Vidro

Cortiça

# Lã de Rocha

A lã de rocha é um produto inorgânico produzido a partir de vários géneros de rochas vulcânicas, sendo de destacar o basalto, fundidas a temperaturas na ordem dos 1600°C, com as fibras obtidas agrupadas a partir de um agente de coesão.



## Caracterização:

| Material | Parâmetros | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Condutibilidade térmica (λ) W/ (m.K) | Massa volúmica (ρ) (kg/m³) | Coeficiente de absorção sonora (α) (-) | Classe de reação ao fogo (RF) (-) | Resistência à difusão da água (DA) (μ) | Carbono incorporado (CI) (kg $Co_2$eq/kg) |
| **Lã de Rocha** | 0,033-0,040 | 40-210 | 0,29-0,90 | A1-A2 | 1-1,3 | 1,05 |

| Lã de Rocha | |
|---|---|
| **Disponibilidade em Portugal** | Elevada disponibilidade, inclusive em superfícies comerciais |
| **Produção em Portugal (unidades fabris)** | Vila das Aves (Porto) |
| **Formato disponível** | Mantas, placas ou rolos |
| **Aplicação** | Paredes, pavimentos, coberturas e tetos |
| **Preço médio em Portugal (€/m²)** | 4,70-28,66 |
| **Vantagens** | Bom isolamento térmico<br>Isolamento acústico<br>Resistência ao fogo |
| **Desvantagens** | Impactes ambientais a nível de potencial de acidificação<br>Absorção de água |

# Lã de Vidro

A lã de vidro é um material inorgânico de origem natural e mineral, produzido a partir de aquecimento de areia e vidro a temperaturas entre 1300-1450 °C. A areia constituinte é de quartzo, dolomite e calcário. O vidro constituinte é usualmente reciclado. Normalmente não são necessárias resinas neste material, a não ser no caso de mantas onde é aconselhado.



## Caracterização:

| Material | Parâmetros | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Condutibilidade térmica (λ) W/ (m.K) | Massa volúmica (ρ) (kg/m³) | Coeficiente de absorção sonora (α) (-) | Classe de reação ao fogo (RF) (-) | Resistência à difusão da água (DA) (μ) | Carbono incorporado (CI) (kg $Co_2$eq/kg) |
| **Lã de Vidro** | 0,030-0,050 | 13-100 | 0,45-0,80 | A1-A2 | 1-1,3 | 1,24 |

| Lã de Vidro | |
|---|---|
| **Disponibilidade em Portugal** | Alguma disponibilidade superfícies comerciais |
| **Produção em Portugal (unidades fabris)** | Bustos (Aveiro) |
| **Formato disponível** | Mantas, placas ou rolos |
| **Aplicação** | Paredes, pavimentos, coberturas e tetos |
| **Preço médio em Portugal (€/m²)** | 8,11-9,85 |
| **Vantagens** | Isolamento térmico<br>Resistência ao fogo |
| **Desvantagens** | Absorção de água |

# Cortiça

A cortiça é um produto de origem natural, obtido a partir do sobreiro (*Quercus Suber*) sendo produzida em Portugal, com particular incidência nas zonas Centro e Sul do país. É constituída por diversos componentes destacando-se a suberina (45%) e a lenhina (27%).



## Caracterização:

| Material | Parâmetros | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Condutibilidade térmica (λ) W/ (m.K) | Massa volúmica (ρ) (kg/m³) | Coeficiente de absorção sonora (α) (-) | Classe de reação ao fogo (RF) (-) | Resistência à difusão da água (DA) (μ) | Carbono incorporado (CI) (kg $Co_2$eq/kg) |
| **Cortiça** | 0,037-0,043 | 110-170 | 0,39-0,85 | E | 5-30 | 0,82 |

| Cortiça | |
|---|---|
| **Disponibilidade em Portugal** | Boa disponibilidade em superfícies comerciais |
| **Produção em Portugal (unidades fabris)** | Coruche (Santarém) |
| **Formato disponível** | Placas ou rolos |
| **Aplicação** | Paredes, pavimentos e coberturas. |
| **Preço médio em Portugal (€/m²)** | 15,74 |
| **Vantagens** | Absorção de água<br>Isolamento térmico |
| **Desvantagens** | Elevada matéria-prima para a sua produção<br>Custo |

## Anexo 10

Tabela A 9 – Caracterização dos materiais utilizados no caso de estudo (Crosslam, sem data; ISB Groupe, 2020; Knauf,2018; Kronoply, 2002; Incropera, 2003; Freitas & Pinto, 1998; Sastre,2000; Termolan Isolamentos Termo-Acústicos, sem data; CEN 2017; IBERA Indústria de betão, 2017; Secil TEK, 2024 )

| Parâmetro / Material | Betonilha | Placa de Gesso Cartonado | Placa OSB | Placa de Pinho (pavimento) | Barrotes de Madeira | Reboco | Lã Mineral (rocha) fachada | Lã Mineral (rocha) meeira | Painel CLT |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Dimensão ($mm^2$) | - | 2500X1200 | 2500X1250 | 60 a 200 por ≥ 900 | 60X200 100X100 | - | 1350X600/1200X600 | 1350X600 | 12000X3000* |
| Espessura (mm) | 60 | 12,5 | 12/15 | 13 | 200 | 7 | 100 | 40/100 | 180 |
| Densidade ($kg/m^3$) | 1850 (+/- 200) | ≥ 888 | 640 (+/- 40) | 520 | 500 | 1600 (+/- 150) | 30/100 | 40 | 550 |
| Resistência térmica ($m^2.K/W$) ou ($m^2.°C/W$) | 0,06** | 0,05** | 0,13** | 0,10** | - | 0,01** | 2,70/3,00 | 1,10/2,85 | 1,39** |
| Condutibilidade térmica, λ (W/m.K) ou (W/m.°C) | 1,00 | 0,25 | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,61 | 0,037/0,033 | 0,035 | 0,13 |
| Calor Específico (J/Kg.K) | - | 1000 | 1215 | 1380 | - | - | 670 | 670 | 2100 |
| Classe de Reação ao Fogo | - | A1 | * | D | - | A1 | A1 | A1 | - |
| Fator de Resistência à Difusão do Vapor de Água-μ | 30 | 10/4*** | Média 400 – Min 250 | 70 | - | 15 | 1 | 1 | 1** |

* Comprimento X Largura máxima
** Valores calculados no Cypetherm SCE-HAB
*** Valor para seco/húmido

Anexo 11.1

# Quadro de materiais

## Fachadas

### Parede de fachada ETICS madeira (8,3 m²)

| Elemento base | |
|---|---|
| Produto | Parede de fachada em sistema ETICS com isolamento em lã de rocha 100 mm, estrutura em barrotes de madeira (60X200 mm²) envolvidos em lã de rocha, com placas OSB de 12 mm a revestir os barrotes e rebocada no exterior |
| Classe | Fachadas leves, estrutura de madeira |
| Origem | Produtos definidos pelo usuário |
| Massa | 63,4 kg/m² |
| Espessura | 0,331 m |

### Parede de fachada ETICS alvenaria (8,3 m²)

| Elemento base | |
|---|---|
| Produto | Parede Simples de Fachada ETICS em alvenaria de 250 mm, rebocada de ambos os lados e com isolamento em lã de rocha de 120 mm |
| Classe | Alvenaria em blocos de terracota maciça |
| Origem | Produtos definidos pelo usuário |
| Massa | 241,7 kg/m² |
| Espessura | 0,392 m |

## Divisórias

### Parede interior madeira (14,85 m²)

| Elemento base | |
|---|---|
| Produto | Parede divisória de madeira com secção de madeira (66X48 mm²) revestida com placas OSB de 9 mm de ambos os lados |
| Classe | Divisórias secas, estrutura de madeira única |
| Origem | ROCKWOOL |
| Massa | 25 kg/m² |
| Espessura | 0,07 m |

### Parede interior alvenaria (14,85 m²)

| Elemento base | |
|---|---|
| Produto | Parede divisória em alvenaria 70 mm com reboco de ambos os lados |
| Classe | Divisórias interiores em alvenaria |
| Origem | Produtos genéricos |
| Massa | 70 kg/m² |
| Espessura | 0,100 m |

## Parede Meeiras

### Parede meeira em madeira (10,3 m²)

| Elemento base | |
|---|---|
| Produto | Parede dupla em madeira de separação de frações constituída por barrotes de madeira (100X100 mm²) envolvidos em lã de rocha 100 mm de cada lado, com caixa de ar ao centro isolada com lã de rocha com 40 mm, placa OSB de 15 mm em ambos os lados, revestimento final com 2 placas de gesso cartonado com 12,5 mm em cada lado. |
| Classe | Fachadas leves, estrutura de madeira |
| Origem | Produtos definidos pelo usuário |
| Massa | 96,2 kg/m² |
| Espessura | 0,320 m |

### Parede meeira em alvenaria (10,3 m²)

| Elemento base | |
|---|---|
| Produto | Parede dupla em tijolo de 150 mm rebocada de ambos os lados e com 40 mm de isolamento em lã de rocha na caixa de ar com 110 mm |
| Classe | Alvenaria em blocos de terracota maciça |
| Origem | Produtos definidos pelo usuário |
| Massa | 381,3 kg/m² |
| Espessura | 0,430 m |

## Lajes

### Laje de separação de frações em madeira (10,1 m²)

| Elemento base | |
|---|---|
| Produto | Lage de separação de pisos com estrutura em CLT de 180 mm revestida por piso resiliente com 12 mm, lã de vidro com 20 mm, betonilha de regularização com 60 mm e revestida por placa de pinho com 13 mm no revestimento final. Possui teto falso constituído por caixa de ar com 25 mm e 2 placas de gesso cartonado com 12,5 mm |
| Classe | Laje de madeira |
| Origem | Produtos definidos pelo usuário |
| Massa | 250 kg/m² |
| Espessura | 0,335 m |

### Laje de separação de frações aligeirada (10,1 m²)

| Elemento base | |
|---|---|
| Produto | Laje aligeirada de separação entre piso constituída por lage aligeirada em blocos cerâmicos com 200 mm, camada de compressão de 40 mm, elemento resiliente com 10 mm, lajeta de betão com 40 mm e revestimento final cerâmico ou pétreo com 7 mm. |
| Classe | Paredes e lajes de concreto |
| Origem | Produtos definidos pelo usuário |
| Massa | 591 kg/m² |
| Espessura | 0,335 m |

## Porta

### Porta (1 unidade. – 1.65 m²)

| Dados | |
|---|---|
| Produto | Porta de madeira EI30 1V ISOBLINDE 39; Rw+C=39dB |
| Classe | Porta de entrada quarto |
| Origem | MALERBA |
| Massa | 25 kg/m² |
| Espessura | 0,06 m |

## Janelas

### Janela (1 unidade – 2,60 m²)

| Dados | |
|---|---|
| Produto | Janela padrão em PVC em vidro duplo 4(16)6, (Rw+Ctr =31 dB) |
| Classe | Vidro duplo |
| Origem | Produtos genéricos |
| Massa | 25 kg/m² |
| Espessura | 0,06 m |
| Caixa de estores | |
| Produto | Caixa de estores em PVC com persiana de enrolar tipo favo de mel: Dn,e,w + Ctr = 46 dB |
| Classe | Caixa de estore de rolo |
| Origem | Produtos genéricos |

# Resultados

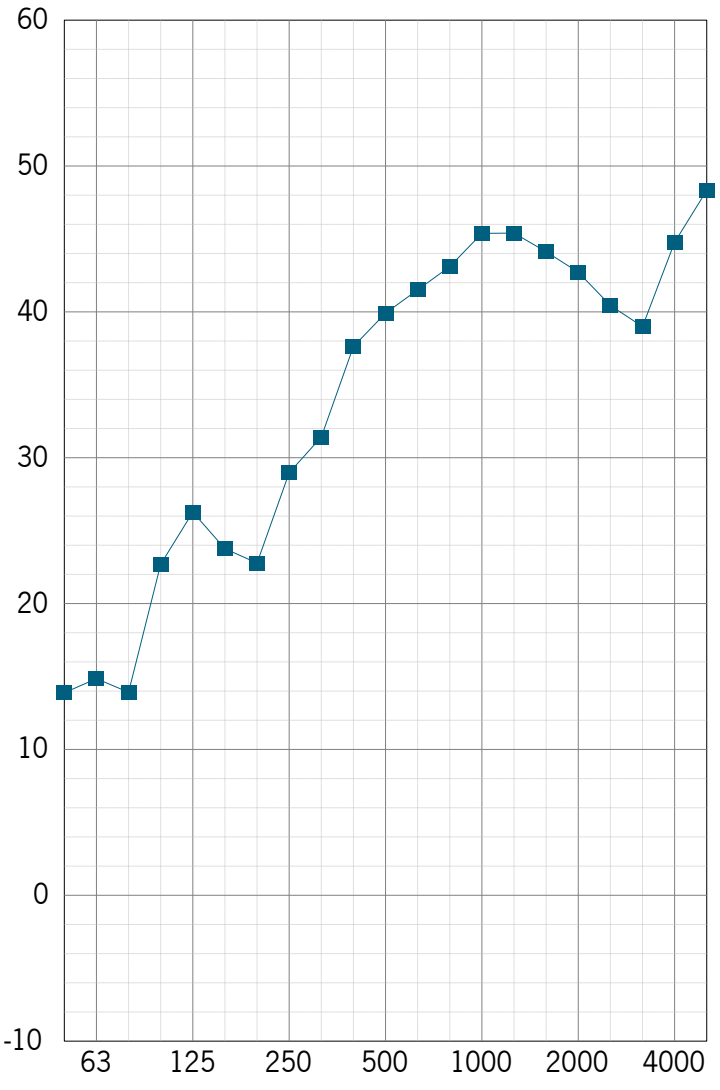
Isolamento sons de condução aérea exterior: Parede de Fachada em Madeira => Edifício 1 – Apartamento 1 – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

## Equação

$D_{nT} = -10 \sum (10\text{-}Di/10)$

O requisito para esta configuração é 33 dB

Este objetivo cumpre-se




| Frequência | $D_{2m,nT,w}$ |
|---|---|
| 50 | 13,9 |
| 63 | 14,9 |
| 80 | 13,9 |
| 100 | 22,7 |
| 125 | 26,3 |
| 160 | 23,8 |
| 200 | 22,8 |
| 250 | 29,0 |
| 315 | 31,4 |
| 400 | 37,6 |
| 500 | 39,9 |
| 630 | 41,5 |
| 800 | 43,1 |
| 1000 | 45,4 |
| 1250 | 45,4 |
| 1600 | 44,1 |
| 2000 | 42,7 |
| 2500 | 40,4 |
| 3150 | 39,0 |
| 4000 | 44,8 |
| 5000 | 48,3 |
| Hz | 40,0 |

**$D_{2m,nT,w}$ = 40 dB**

# Análise (Gráfico)

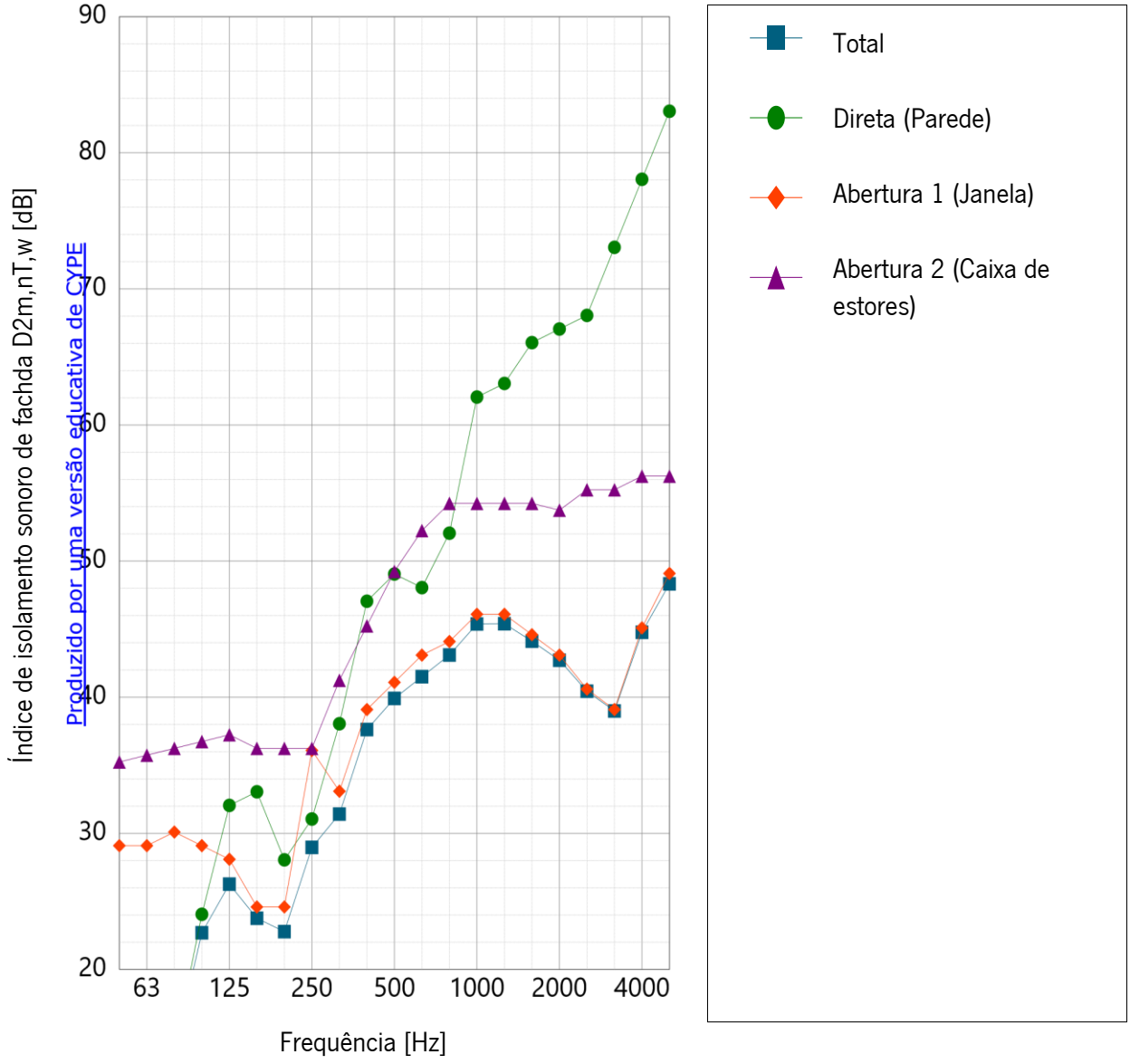
Isolamento sons de condução aérea exterior: Parede de Fachada em Madeira => Edifício 1 – Apartamento 1 – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

**Equação**

$D_{nT} = -10 \sum (10\text{-}Di/10)$

O requisito para esta configuração é 33 dB

Este objetivo cumpre-se




Produzido por uma versão educativa de CYPE

$D_{2m,nT,w}$ = 40 dB

# Resultados

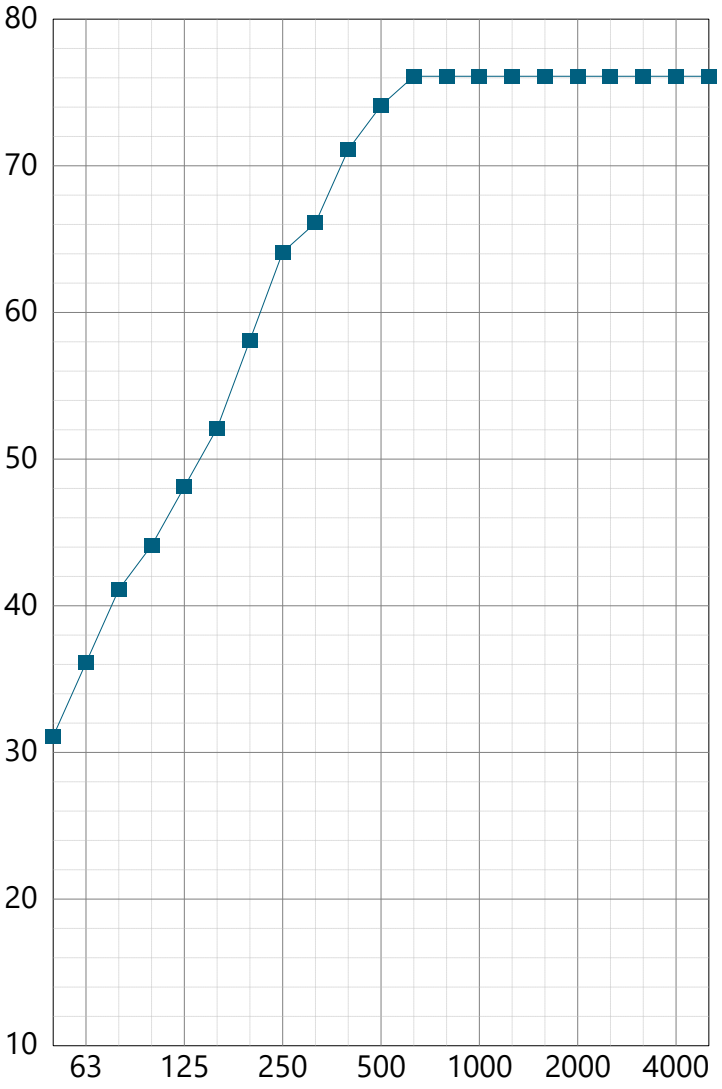
Isolamento a sons de condução aérea interior: Parede Meeira de Madeira – Edifício 2 – Apartamento 1 – Quarto 2 [Quartos ou zonas de estar dos fogos] => Parede Meeira de Madeira – Edifício 1 – Apartamento – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos

**Equação**

$D_{nT} = -10 \sum (10\text{-}Di/10)$

O requisito para esta configuração é 50 dB

Este objetivo cumpre-se




| Frequência | $D_{nT,w}$ |
|---|---|
| 50 | 31,1 |
| 63 | 36,1 |
| 80 | 41,1 |
| 100 | 44,1 |
| 125 | 48,1 |
| 160 | 52,1 |
| 200 | 58,1 |
| 250 | 64,1 |
| 315 | 66,1 |
| 400 | 71,1 |
| 500 | 74,1 |
| 630 | 76,1 |
| 800 | 76,1 |
| 1000 | 76,1 |
| 1250 | 76,1 |
| 1600 | 76,1 |
| 2000 | 76,1 |
| 2500 | 76,1 |
| 3150 | 76,1 |
| 4000 | 76,1 |
| 5000 | 76,1 |
| Hz | 72,0 |

**$D_{nT,w}$ = 72 dB**

# Análise (Gráfico)

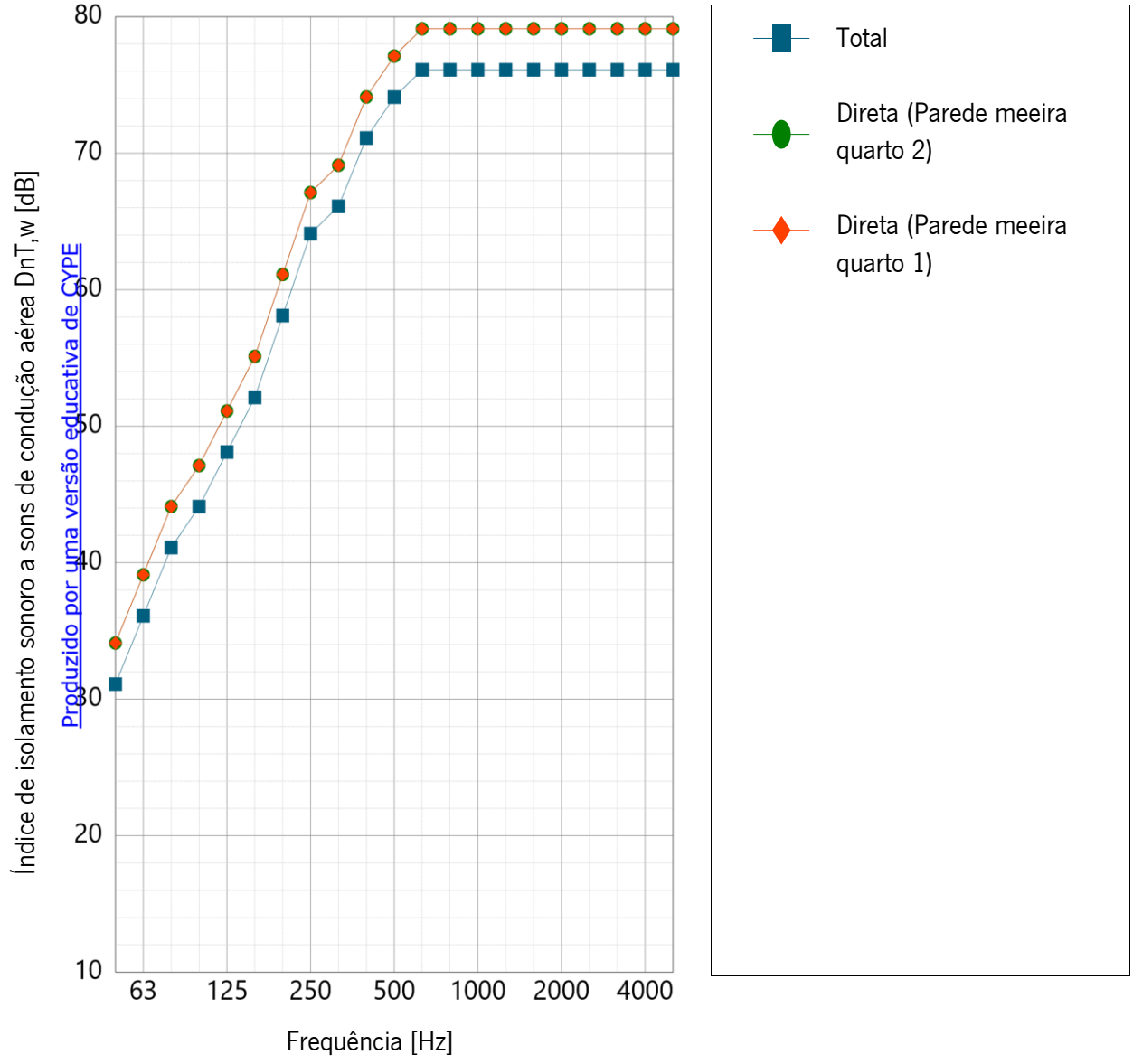
Isolamento a sons de condução aérea interior: Parede Meeira de Madeira – Edifício 2 – Apartamento 1 – Quarto 2 [Quartos ou zonas de estar dos fogos] => Parede Meeira de Madeira – Edifício 1 – Apartamento – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

**Equação**

$D_{nT} = -10 \sum (10\text{-}Di/10)$

O requisito para esta configuração é 50 dB

Este objetivo cumpre-se




Produzido por uma versão educativa de CYPE

$D_{nT,w}$ = 72 dB

# Resultados

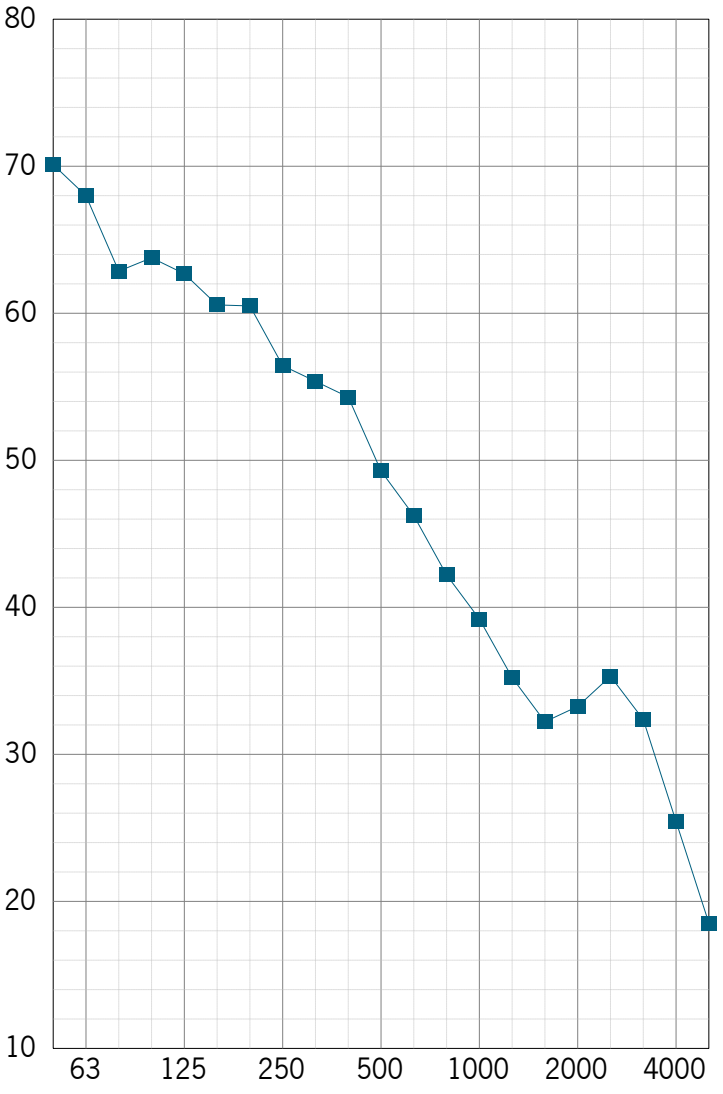
Sons de percussão: Laje de Separação de Frações em Madeira – Edifício 1 – Apartamento 2 – Quarto 3 [Quartos ou zonas de estar dos fogos] => Laje de Separação de Frações em Madeira – Edifício 1 – Apartamento 1 – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

**Equação**

$L'_{nT} = 10 \sum lg\,(10Li/10)$

O requisito para esta configuração é 60 dB

Este objetivo cumpre-se




| Frequência | $L'_{nT,w}$ |
|---|---|
| 50 | 70,1 |
| 63 | 68,0 |
| 80 | 62,9 |
| 100 | 63,8 |
| 125 | 62,7 |
| 160 | 60,6 |
| 200 | 60,5 |
| 250 | 56,4 |
| 315 | 55,4 |
| 400 | 54,3 |
| 500 | 49,3 |
| 630 | 46,2 |
| 800 | 42,2 |
| 1000 | 39,2 |
| 1250 | 35,2 |
| 1600 | 32,2 |
| 2000 | 33,3 |
| 2500 | 35,3 |
| 3150 | 32,4 |
| 4000 | 25,4 |
| 5000 | 18,5 |
| Hz | 53,0 |

**$L'_{nT,w}$ = 53 dB**

# Análise (Gráfico)

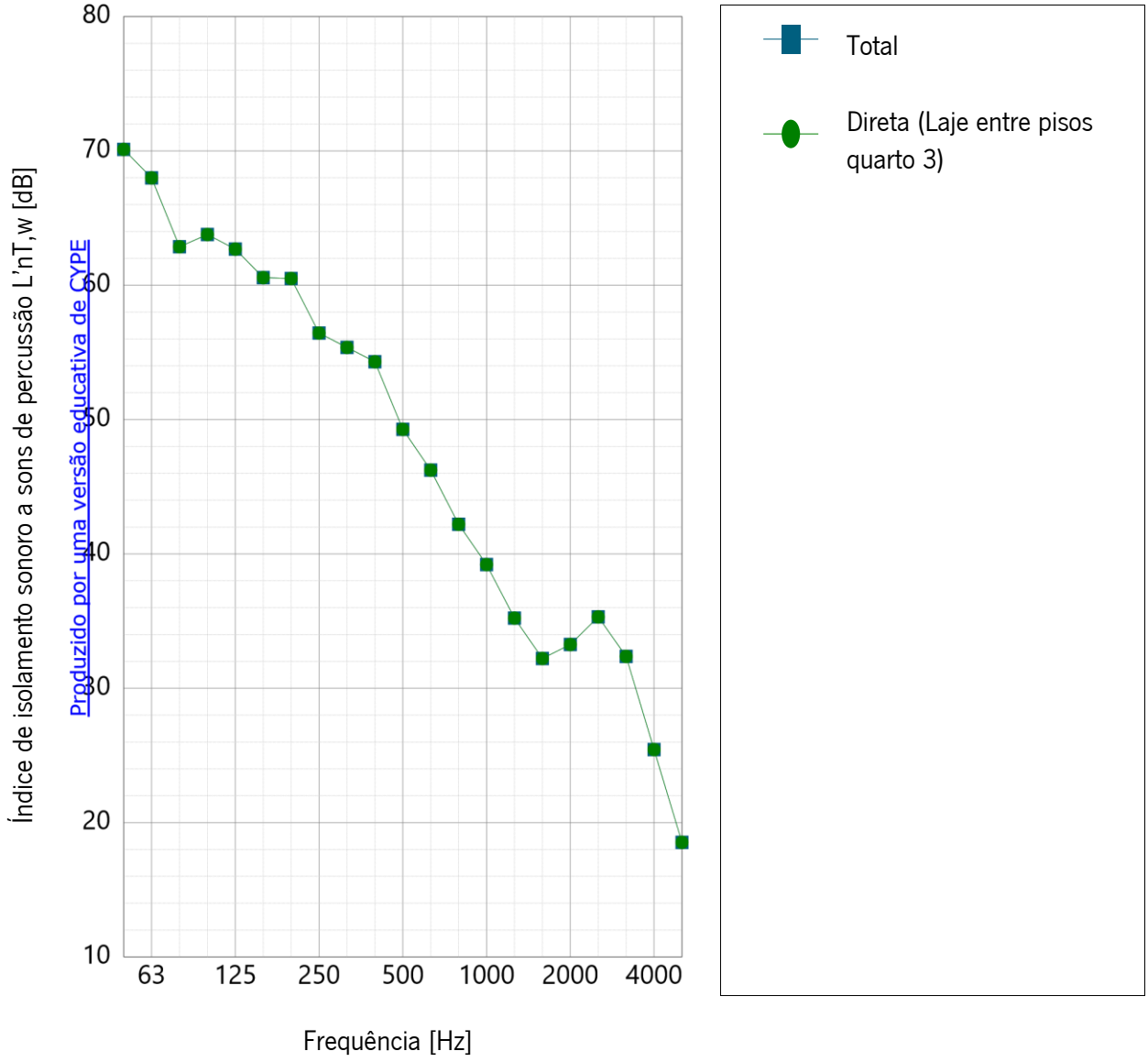
Sons de percussão: Laje de Separação de Frações em Madeira – Edifício 1 – Apartamento 2 – Quarto 3 [Quartos ou zonas de estar dos fogos] => Laje de Separação de Frações em Madeira – Edifício 1 – Apartamento 1 – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

## Equação

$L'_{nT} = 10 \sum \lg (10Li/10)$

O requisito para esta configuração é 60 dB

Este objetivo cumpre-se




Produzido por uma versão educativa de CYPE

$L'_{nT,w}$ = 53 dB

# Resultados

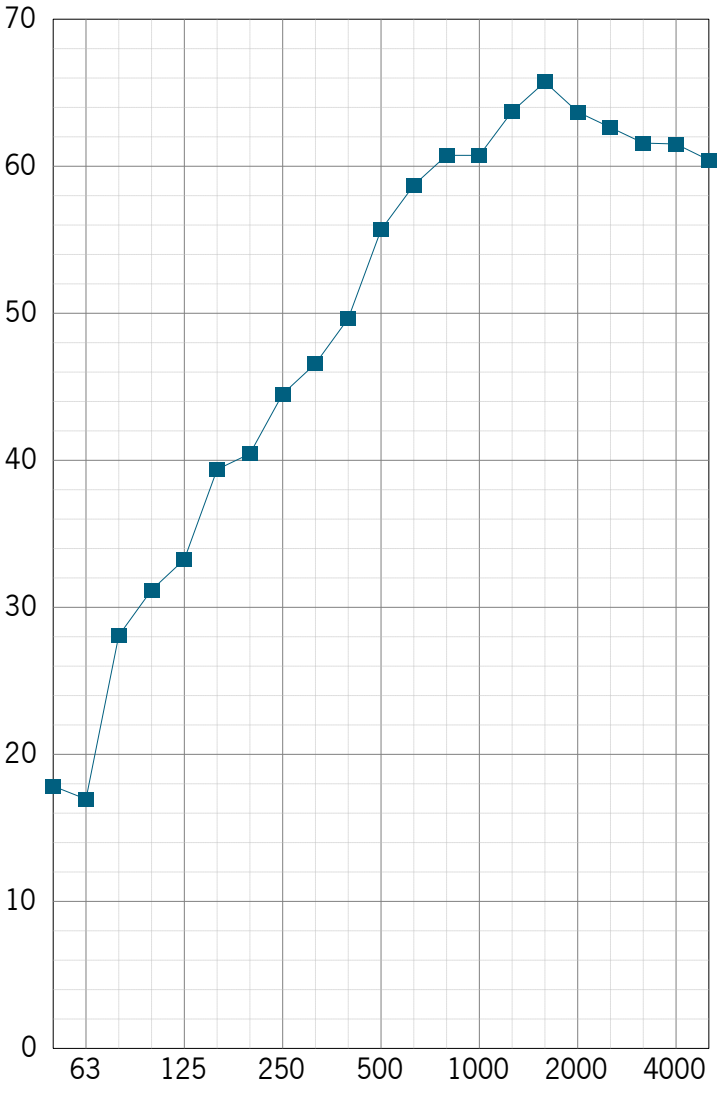
Isolamento a sons de condução aérea interior: Laje de Separação de Frações em Madeira – Edifício 1 – Apartamento 2 – Quarto 3 [Quartos ou zonas de estar dos fogos] => Laje de Separação de Frações em Madeira – Edifício 1 – Apartamento 1 – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

**Equação**

$D_{nT} = -10 \sum (10\text{-}Di/10)$

O requisito para esta configuração é 50 dB

Este objetivo cumpre-se




| Frequência | $D_{nT,w}$ |
|---|---|
| 50 | 17,8 |
| 63 | 17,0 |
| 80 | 28,1 |
| 100 | 31,2 |
| 125 | 33,3 |
| 160 | 39,4 |
| 200 | 40,4 |
| 250 | 44,5 |
| 315 | 46,6 |
| 400 | 49,6 |
| 500 | 55,7 |
| 630 | 58,7 |
| 800 | 60,7 |
| 1000 | 60,7 |
| 1250 | 63,7 |
| 1600 | 65,7 |
| 2000 | 63,7 |
| 2500 | 62,6 |
| 3150 | 61,6 |
| 4000 | 61,5 |
| 5000 | 60,4 |
| Hz | 55,0 |

**$D_{nT,w}$ = 55 dB**

# Análise (Gráfico)

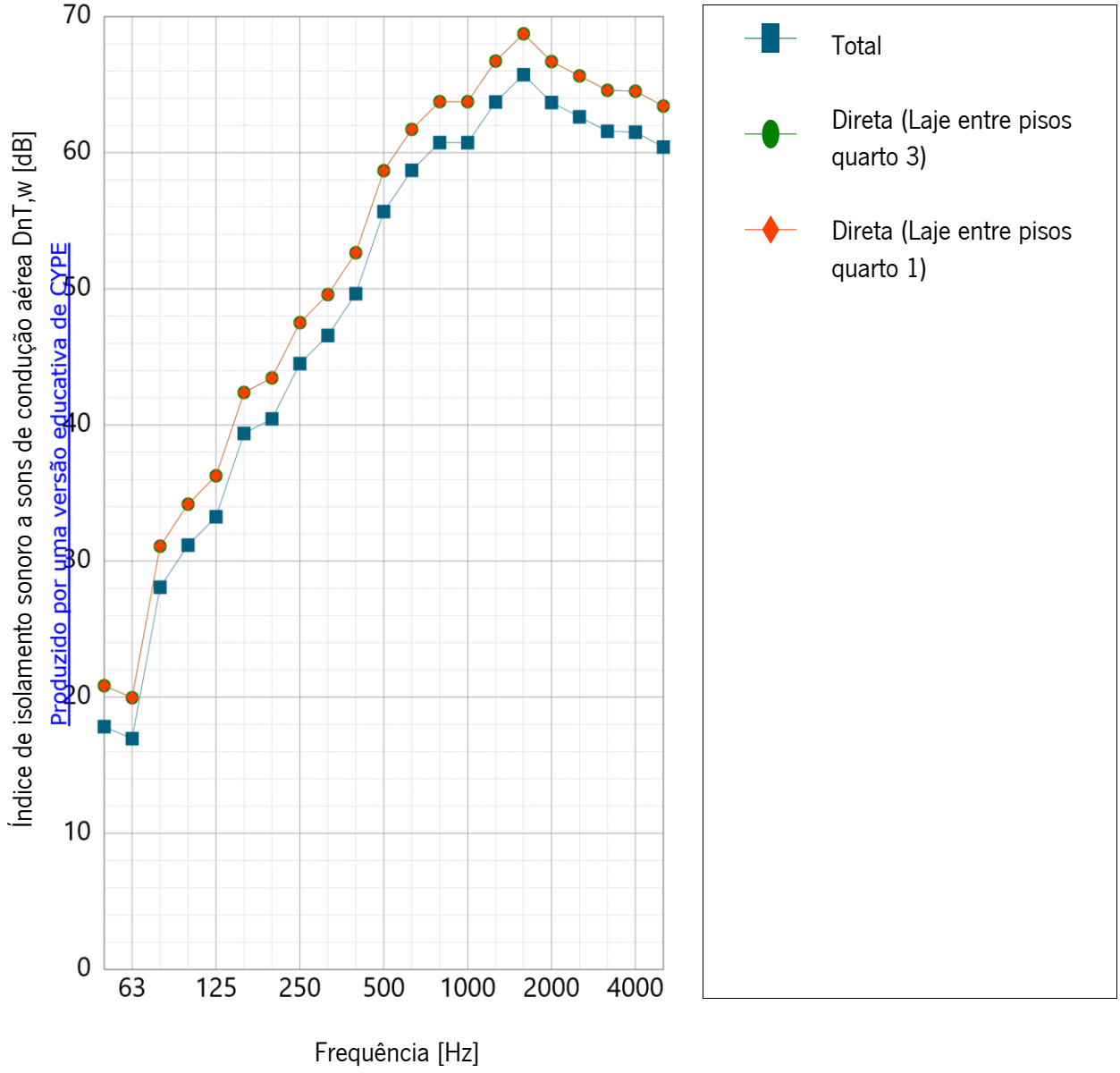
Isolamento a sons de condução aérea interior: Laje de Separação de Frações em Madeira – Edifício 1 – Apartamento 2 – Quarto 3 [Quartos ou zonas de estar dos fogos] => Laje de Separação de Frações em Madeira – Edifício 1 – Apartamento 1 – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

**Equação**

$D_{nT} = -10 \sum (10\text{-}Di/10)$

O requisito para esta configuração é 50 dB

Este objetivo cumpre-se




$D_{nT,w}$ = 55 dB

# Resultados

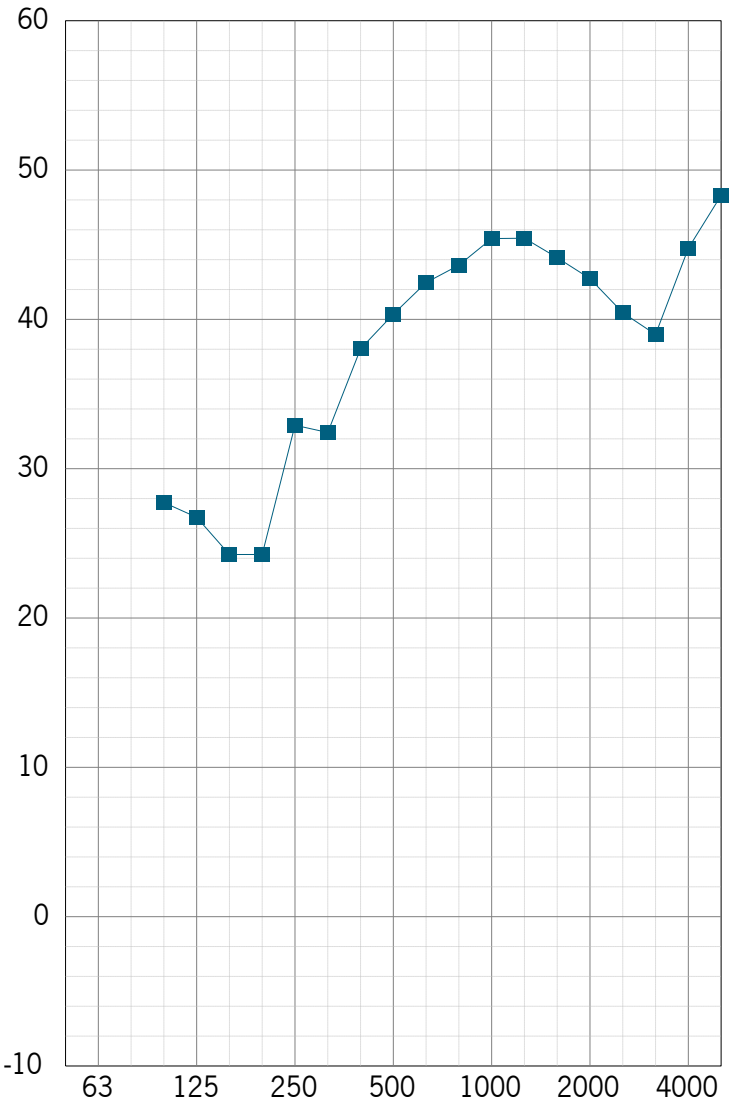
Isolamento sons de condução aérea exterior: Parede de Fachada em Alvenaria => Edifício 1 – Apartamento 1 – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

**Equação**

$D_{nT} = -10 \sum (10\text{-}Di/10)$

O requisito para esta configuração é 33 dB

Este objetivo cumpre-se




| Frequência | $D_{2m,nT,w}$ |
|---|---|
| 50 | - |
| 63 | - |
| 80 | - |
| 100 | 27,7 |
| 125 | 26,7 |
| 160 | 24,3 |
| 200 | 24,3 |
| 250 | 32,9 |
| 315 | 32,4 |
| 400 | 38,0 |
| 500 | 40,3 |
| 630 | 42,5 |
| 800 | 43,6 |
| 1000 | 45,4 |
| 1250 | 45,4 |
| 1600 | 44,1 |
| 2000 | 42,7 |
| 2500 | 40,4 |
| 3150 | 39,0 |
| 4000 | 44,8 |
| 5000 | 48,3 |
| Hz | 40,0 |

**$D_{2m,nT,w}$ = 40 dB**

# Análise (Gráfico)

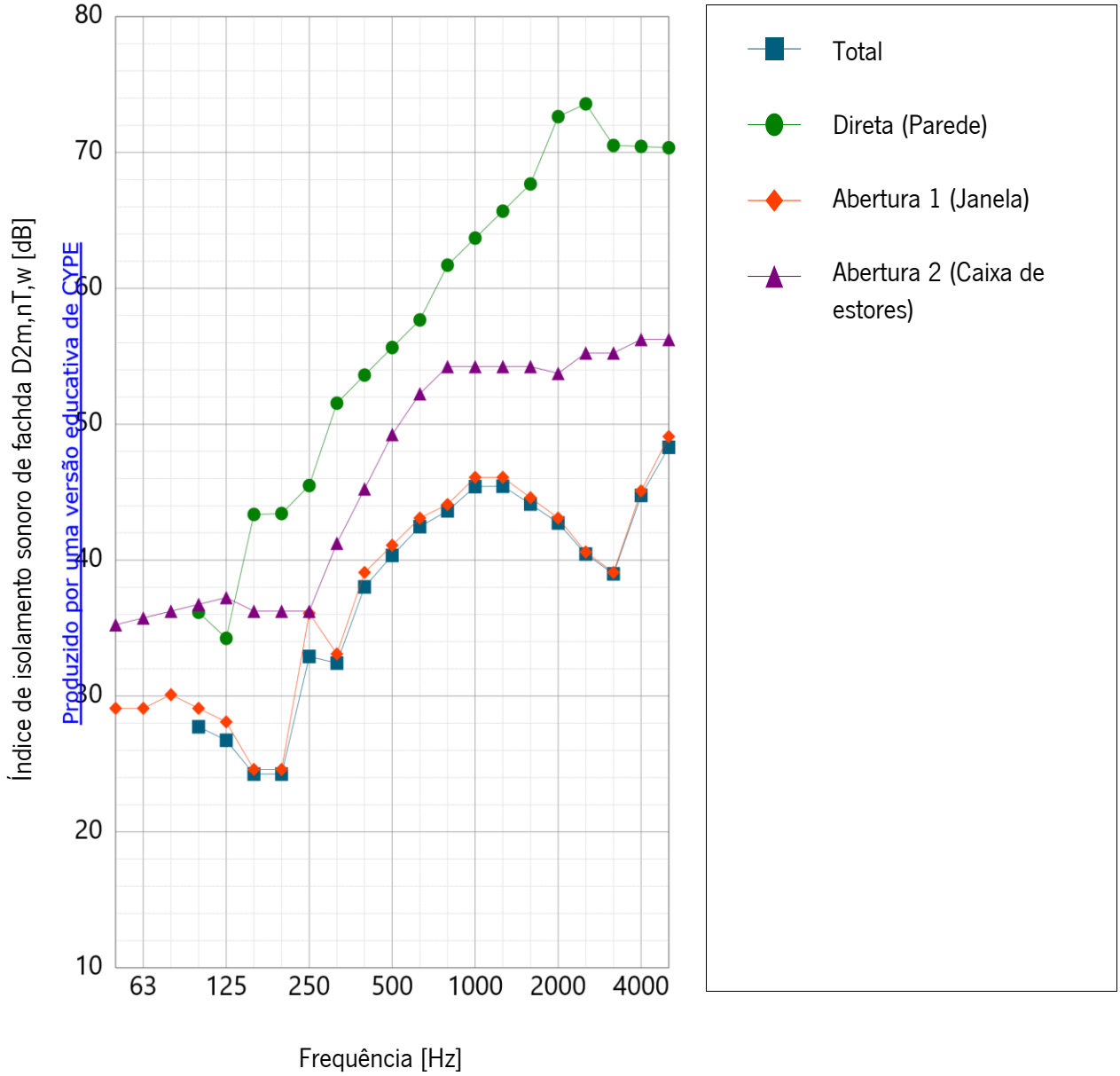
Isolamento sons de condução aérea exterior: Parede de Fachada em Alvenaria => Edifício 1 – Apartamento 1 – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos

**Equação**

DnT = -10 ∑ (10-Di/10)

O requisito para esta configuração é 33 dB

Este objetivo cumpre-se




Produzido por uma versão educativa de CYPE

$D_{2m,nT,w}$ = 40 dB

# Resultados

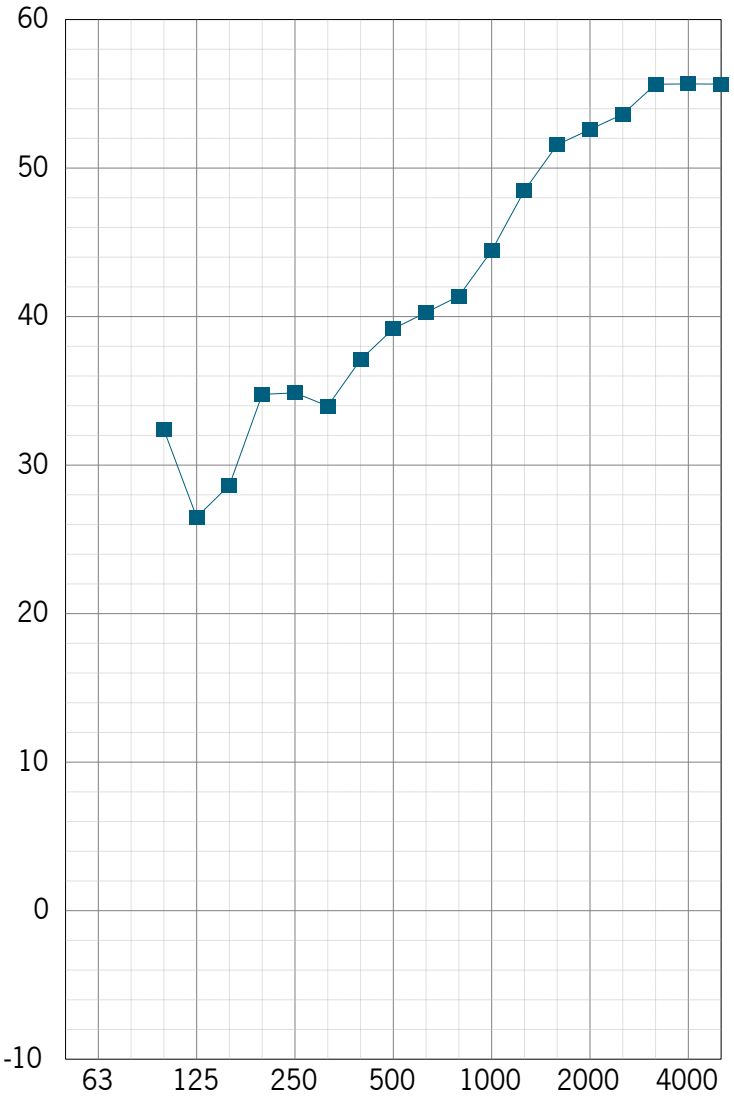
Isolamento a sons de condução aérea interior: Parede Meeira em Alvenaria – Edifício 2 – Apartamento 1 – Quarto 2 [Quartos ou zonas de estar dos fogos] => Parede Meeira em Alvenaria – Edifício 1 – Apartamento – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

**Equação**

DnT = -10 ∑ (10-Di/10)

O requisito para esta configuração é 50 dB

Este objetivo não se cumpre




| Frequência | $D_{nT,w}$ |
|---|---|
| 50 | - |
| 63 | - |
| 80 | - |
| 100 | 32,4 |
| 125 | 26,5 |
| 160 | 28,7 |
| 200 | 34,8 |
| 250 | 34,9 |
| 315 | 34,0 |
| 400 | 37,1 |
| 500 | 39,2 |
| 630 | 40,3 |
| 800 | 41,4 |
| 1000 | 44,4 |
| 1250 | 48,5 |
| 1600 | 51,6 |
| 2000 | 52,6 |
| 2500 | 53,6 |
| 3150 | 55,6 |
| 4000 | 55,7 |
| 5000 | 55,7 |
| Hz | 43,0 |

**$D_{nT,w}$ = 43 dB**

# Análise (Gráfico)

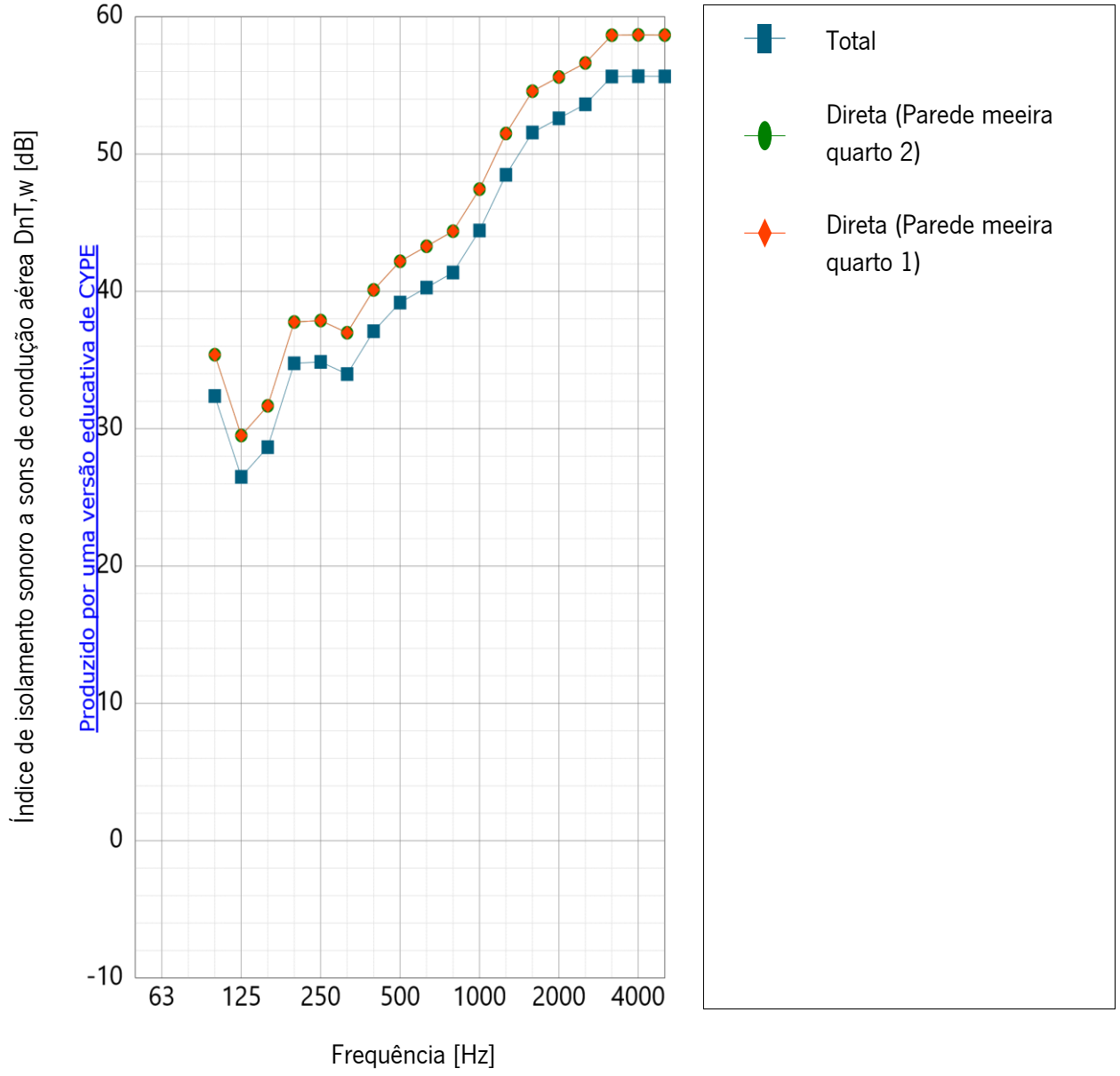
Isolamento a sons de condução aérea interior: Parede Meeira em Alvenaria – Edifício 2 – Apartamento 1 – Quarto 2 [Quartos ou zonas de estar dos fogos] => Parede Meeira em Alvenaria – Edifício 1 – Apartamento – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

**Equação**

DnT = -10 ∑ (10-Di/10)

O requisito para esta configuração é 50 dB

Este objetivo não se cumpre




$D_{nT,w}$ = 43 dB

# Resultados

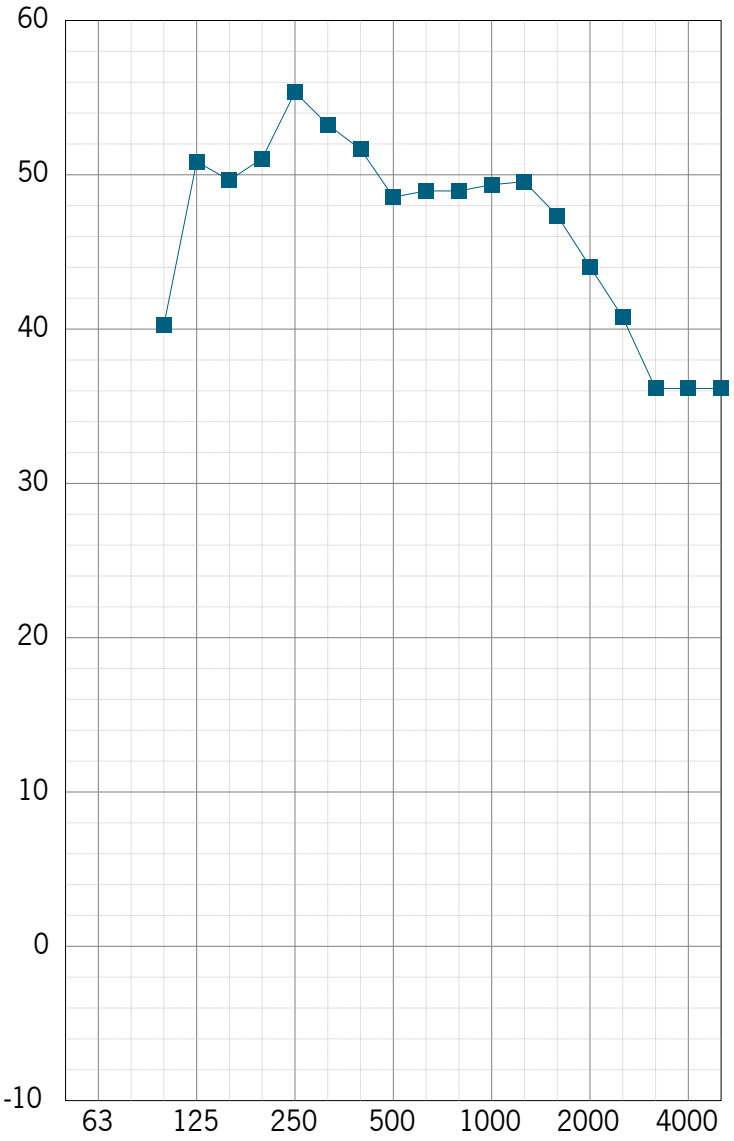
Sons de percussão: Laje de Sepração de Frações Aligeirada – Edifício 1 – Apartamento 2 – Quarto 3 [Quartos ou zonas de estar dos fogos] => Laje de Separação de Frações Aligeirada – Edifício 1 – Apartamento 1 – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

**Equação**

$L'nT = 10 \sum lg (10Li/10)$

O requisito para esta configuração é 60 dB

Este objetivo cumpre-se




| Frequência | $L'_{nT,w}$ |
|---|---|
| 50 | - |
| 63 | - |
| 80 | - |
| 100 | 40,3 |
| 125 | 50,9 |
| 160 | 49,7 |
| 200 | 51,1 |
| 250 | 55,4 |
| 315 | 53,3 |
| 400 | 51,7 |
| 500 | 48,6 |
| 630 | 49,0 |
| 800 | 49,0 |
| 1000 | 49,4 |
| 1250 | 49,6 |
| 1600 | 47,4 |
| 2000 | 44,1 |
| 2500 | 40,8 |
| 3150 | 36,2 |
| 4000 | 36,2 |
| 5000 | 36,2 |
| Hz | 51,0 |

**$L'_{nT,w}$ = 51 dB**

# Análise (Gráfico)

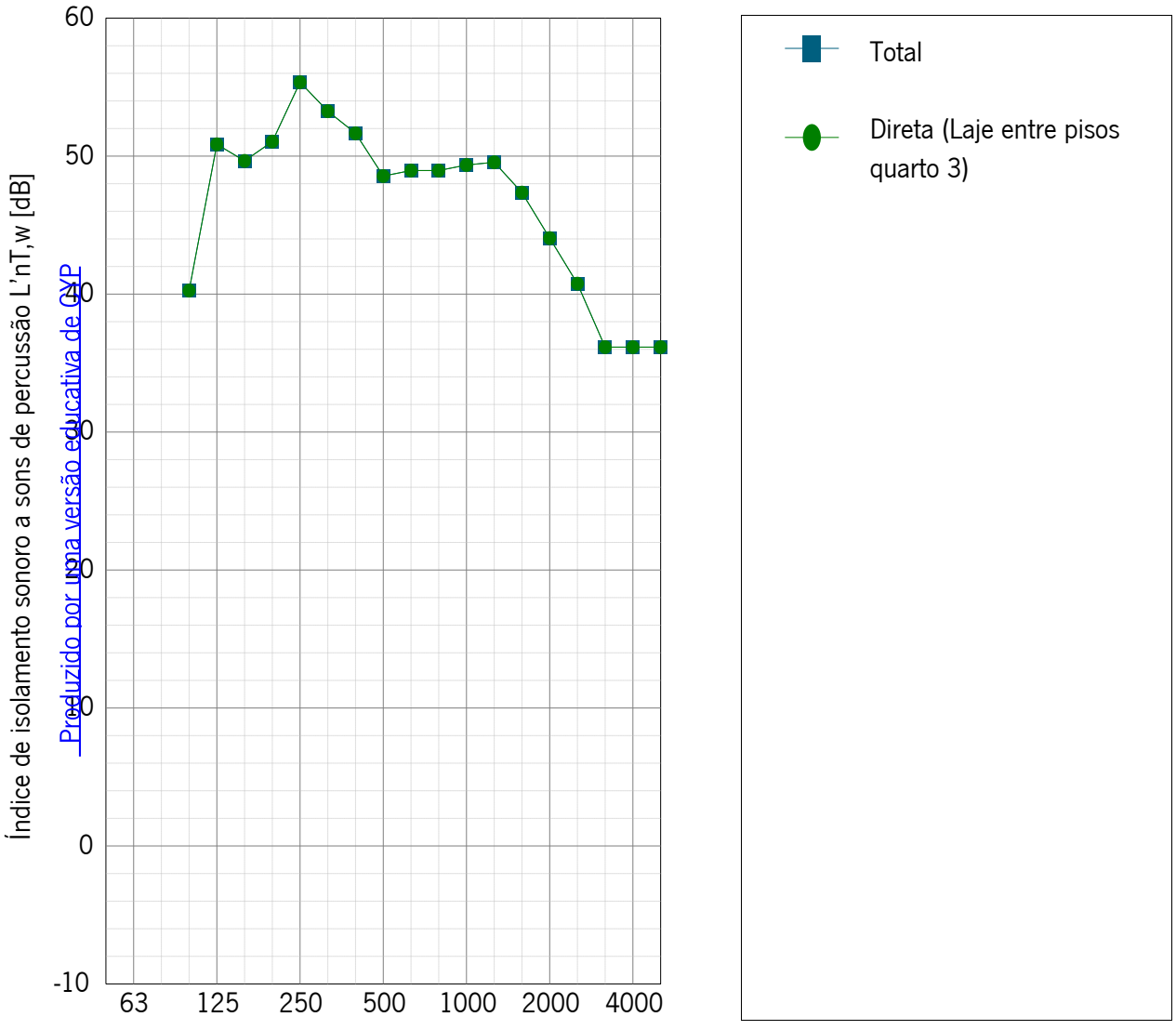
Sons de percussão: Laje de Separação de Frações Aligeirada – Edifício 1 – Apartamento 2 – Quarto 3 [Quartos ou zonas de estar dos fogos] => Laje de Separação de Frações Aligeirada – Edifício 1 – Apartamento 1 – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

**Equação**

L'nT = 10 ∑ lg (10Li/10)

O requisito para esta configuração é 60 dB

Este objetivo cumpre-se




Produzido por uma versão educativa de QXP

$L'_{nT,w}$ = 51 dB

# Resultados

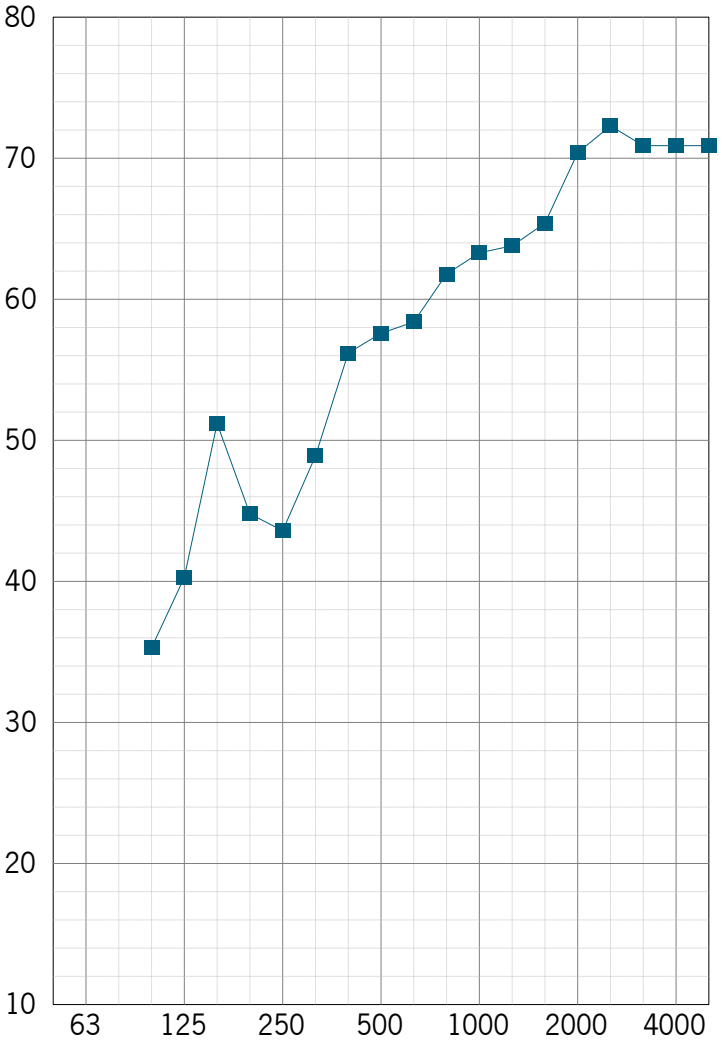
Isolamento a sons de condução aérea interior: Laje de Separação de Frações Aligeirada – Edifício 1 – Apartamento 2 – Quarto 3 [Quartos ou zonas de estar dos fogos] => Laje de Separação de Frações Aligeirada – Edifício 1 – Apartamento 1 – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

**Equação**

DnT = -10 ∑ (10-Di/10)

O requisito para esta configuração é 50 dB

Este objetivo cumpre-se




| Frequência | $D_{nT,w}$ |
|---|---|
| 50 | - |
| 63 | - |
| 80 | - |
| 100 | 35,3 |
| 125 | 40,3 |
| 160 | 51,2 |
| 200 | 44,8 |
| 250 | 43,6 |
| 315 | 48,9 |
| 400 | 56,2 |
| 500 | 57,6 |
| 630 | 58,4 |
| 800 | 61,8 |
| 1000 | 63,3 |
| 1250 | 63,8 |
| 1600 | 65,4 |
| 2000 | 70,4 |
| 2500 | 72,3 |
| 3150 | 70,9 |
| 4000 | 70,9 |
| 5000 | 70,9 |
| Hz | 59,0 |

**$D_{nT,w}$ = 59 dB**

# Análise (Gráfico)

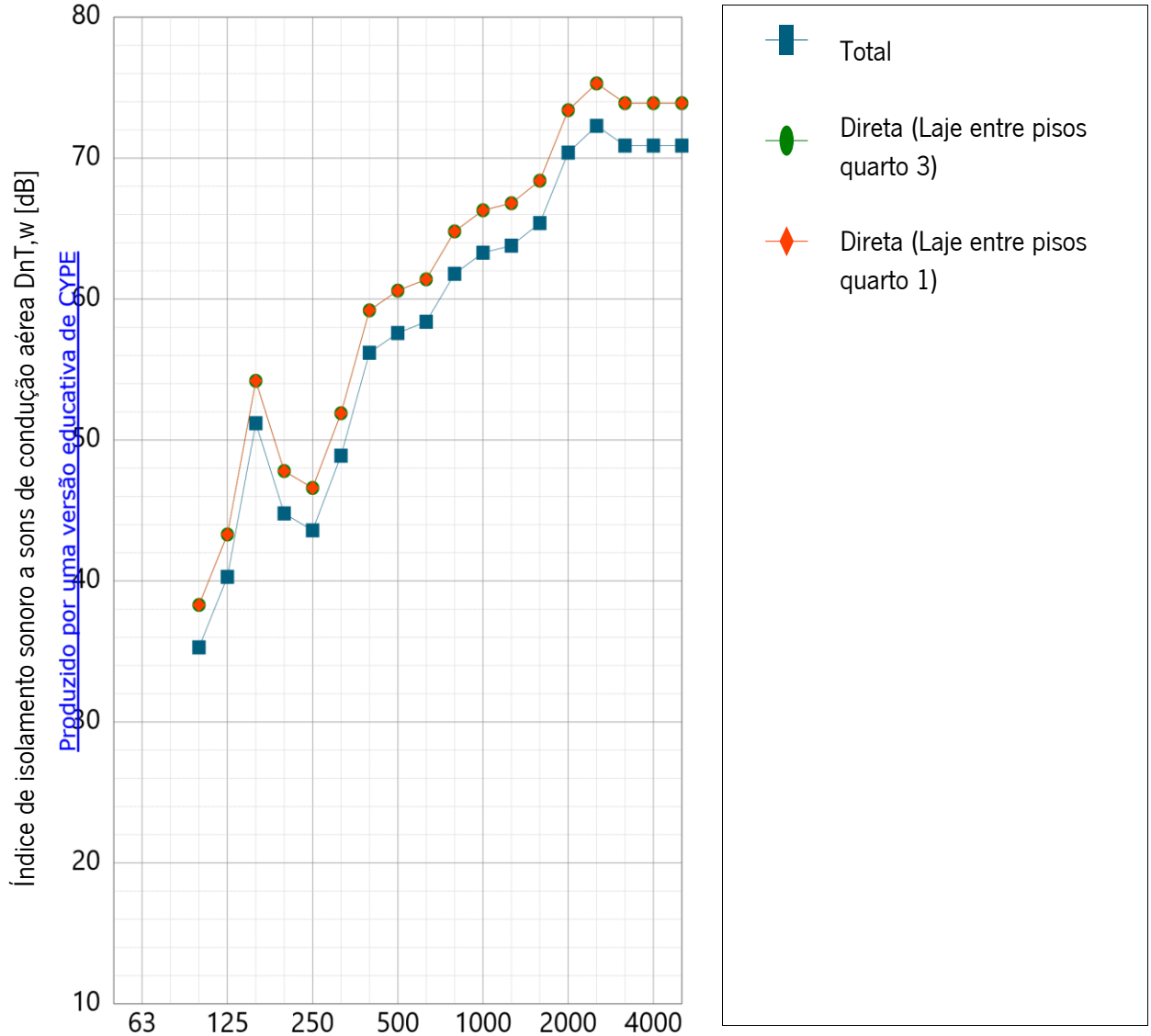
Isolamento a sons de condução aérea interior: Laje de Separação de Frações Aligeirada – Edifício 1 – Apartamento 2 – Quarto 3 [Quartos ou zonas de estar dos fogos] => Laje de Separação de Frações Aligeirada – Edifício 1 – Apartamento 1 – Quarto 1 [Quartos ou zonas de estar dos fogos]

**Equação**

$DnT = -10 \sum (10\text{-}Di/10)$

O requisito para esta configuração é 50 dB

Este objetivo cumpre-se




Produzido por uma versão educativa de CYPE

$D_{nT,w}$ = 59 dB

Anexo 11.3

# Listagem de Resultados

## Listagem de resultados

Soluções construtivas em madeira Data: 10/10/24

### 1. Z01 – Edifício 1 – Apartamento 1

1.1. Quarto 1

Tipo Quartos ou zonas de estar dos fogos

Volume 26,26 m³

| Isolamento sons de condução aérea exterior | Área/Comprimento | DnT,w (dB) | C (dB) | Ctr (dB) | D2m,nT,w (dB) | Exigido (dB) | | Cumpre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fachadas | 10,90m² | 40 | -2 | -6 | 40 | ≥ 33 | + 7 | ✓ |
| **Isolamento a sons de condução aérea interior** | **Área/Comprimento** | **DnT,w (dB)** | **C (dB)** | **Ctr (dB)** | **DnT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 2 | 20,60m² | 72 | -4 | -11 | 72 | ≥ 50 | + 22 | ✓ |
| Quarto 3 | 20,20m² | 55 | -2 | -8 | 55 | ≥ 50 | + 5 | ✓ |
| **Sons de percussão** | **Área/Comprimento** | | | | **L'nT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 3 | 10,10m² | | | | 53 | ≤ 60 | - 7 | ✓ |

### 2. Z02 – Edifício 2 – Apartamento 2

2.1. Quarto 2

Tipo Quartos ou zonas de estar dos fogos

Volume 26,26 m³

| Isolamento sons de condução aérea exterior | Área/Comprimento | DnT,w (dB) | C (dB) | Ctr (dB) | D2m,nT,w (dB) | Exigido (dB) | | Cumpre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fachadas | 10,90m² | 40 | -2 | -6 | 40 | ≥ 33 | + 7 | ✓ |
| **Isolamento a sons de condução aérea interior** | **Área/Comprimento** | **DnT,w (dB)** | **C (dB)** | **Ctr (dB)** | **DnT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 1 | 20,60m² | 72 | -4 | -11 | 72 | ≥ 50 | + 22 | ✓ |
| Quarto 4 | 20,20m² | 55 | -2 | -8 | 55 | ≥ 50 | + 5 | ✓ |
| **Sons de percussão** | **Área/Comprimento** | | | | **L'nT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 4 | 10,10m² | | | | 53 | ≤ 60 | - 7 | ✓ |

### 3. Z03 – Edifício – Apartamento 2

2.1. Quarto 3

Tipo Quartos ou zonas de estar dos fogos

Volume 26,26 m³

| Isolamento sons de condução aérea exterior | Área/Comprimento | DnT,w (dB) | C (dB) | Ctr (dB) | D2m,nT,w (dB) | Exigido (dB) | | Cumpre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fachadas | 10,90m² | 40 | -2 | -6 | 40 | ≥ 33 | + 7 | ✓ |
| **Isolamento a sons de condução aérea interior** | **Área/Comprimento** | **DnT,w (dB)** | **C (dB)** | **Ctr (dB)** | **DnT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 4 | 20,60m² | 72 | -4 | -11 | 72 | ≥ 50 | + 22 | ✓ |
| Quarto 1 | 20,20m² | 55 | -2 | -8 | 55 | ≥ 50 | + 5 | ✓ |
| **Sons de percussão** | **Área/Comprimento** | | | | **L'nT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 1 | 10,10m² | | | | 53 | ≤ 60 | - 7 | ✓ |

### 4. Z04 – Edifício 2 – Apartamento 2

4.1. Quarto 4

Tipo Quartos ou zonas de estar dos fogos

Volume 26,26 m³

| Isolamento sons de condução aérea exterior | Área/Comprimento | DnT,w (dB) | C (dB) | Ctr (dB) | D2m,nT,w (dB) | Exigido (dB) | | Cumpre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fachadas | 10,90m² | 40 | -2 | -6 | 40 | ≥ 33 | + 7 | ✓ |
| **Isolamento a sons de condução aérea interior** | **Área/Comprimento** | **DnT,w (dB)** | **C (dB)** | **Ctr (dB)** | **DnT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 3 | 20,60m² | 72 | -4 | -11 | 72 | ≥ 50 | + 22 | ✓ |
| Quarto 2 | 20,20m² | 55 | -2 | -8 | 55 | ≥ 50 | + 5 | ✓ |
| **Sons de percussão** | **Área/Comprimento** | | | | **L'nT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 2 | 10,10m² | | | | 53 | ≤ 60 | - 7 | ✓ |

## Listagem de resultados

Soluções construtivas em alvenaria Data: 10/10/24

### 5. Z05 – Edifício 1 – Apartamento 1

5.1. Quarto 1

Tipo Quartos ou zonas de estar dos fogos

Volume 26,26 m³

| Isolamento sons de condução aérea exterior | Área/Comprimento | DnT,w (dB) | C (dB) | Ctr (dB) | D2m,nT,w (dB) | Exigido (dB) | | Cumpre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fachadas | 10,90m² | 40 | -1 | -4 | 40 | ≥ 33 | + 7 | ✓ |
| **Isolamento a sons de condução aérea interior** | **Área/Comprimento** | **DnT,w (dB)** | **C (dB)** | **Ctr (dB)** | **DnT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 2 | 20,60m² | 43 | -1 | -4 | 43 | ‡ 50 | - 7 | ✗ |
| Quarto 3 | 20,20m² | 59 | -2 | -8 | 59 | ≥ 50 | + 9 | ✓ |
| **Sons de percussão** | **Área/Comprimento** | | | | **L'nT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 3 | 10,10m² | | | | 51 | ≤ 60 | - 9 | ✓ |

### 6. Z06 – Edifício 2 – Apartamento 1

6.1. Quarto 2

Tipo Quartos ou zonas de estar dos fogos

Volume 26,26 m³

| Isolamento sons de condução aérea exterior | Área/Comprimento | DnT,w (dB) | C (dB) | Ctr (dB) | D2m,nT,w (dB) | Exigido (dB) | | Cumpre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fachadas | 10,90m² | 40 | -1 | -4 | 40 | ≥ 33 | + 7 | ✓ |
| **Isolamento a sons de condução aérea interior** | **Área/Comprimento** | **DnT,w (dB)** | **C (dB)** | **Ctr (dB)** | **DnT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 1 | 20,60m² | 43 | -1 | -4 | 43 | ‡ 50 | - 7 | ✗ |
| Quarto 4 | 20,20m² | 59 | -2 | -8 | 59 | ≥ 50 | + 9 | ✓ |
| **Sons de percussão** | **Área/Comprimento** | | | | **L'nT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 4 | 10,10m² | | | | 51 | ≤ 60 | - 9 | ✓ |

## 7. Z07 – Edifício 1 – Apartamento 2

7.1. Quarto 3

Tipo Quartos ou zonas de estar dos fogos

Volume 26,26 m³

| Isolamento sons de condução aérea exterior | Área/Comprimento | DnT,w (dB) | C (dB) | Ctr (dB) | D2m,nT,w (dB) | Exigido (dB) | | Cumpre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fachadas | 10,90m² | 40 | -1 | -4 | 40 | ≥ 33 | + 7 | ✓ |
| **Isolamento a sons de condução aérea interior** | **Área/Comprimento** | **DnT,w (dB)** | **C (dB)** | **Ctr (dB)** | **DnT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 4 | 20,60m² | 43 | -1 | -4 | 43 | ‡ 50 | - 7 | ✗ |
| Quarto 1 | 20,20m² | 59 | -2 | -8 | 59 | ≥ 50 | + 9 | ✓ |
| **Sons de percussão** | **Área/Comprimento** | | | | **L'nT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 1 | 10,10m² | | | | 51 | ≤ 60 | - 9 | ✓ |

## 8. Z08 – Edifício 2 – Apartamento 2

8.1. Quarto 4

Tipo Quartos ou zonas de estar dos fogos

Volume 26,26 m³

| Isolamento sons de condução aérea exterior | Área/Comprimento | DnT,w (dB) | C (dB) | Ctr (dB) | D2m,nT,w (dB) | Exigido (dB) | | Cumpre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fachadas | 10,90m² | 40 | -1 | -4 | 40 | ≥ 33 | + 7 | ✓ |
| **Isolamento a sons de condução aérea interior** | **Área/Comprimento** | **DnT,w (dB)** | **C (dB)** | **Ctr (dB)** | **DnT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 3 | 20,60m² | 43 | -1 | -4 | 43 | ‡ 50 | - 7 | ✗ |
| Quarto 2 | 20,20m² | 59 | -2 | -8 | 59 | ≥ 50 | + 9 | ✓ |
| **Sons de percussão** | **Área/Comprimento** | | | | **L'nT,w (dB)** | **Exigido (dB)** | | **Cumpre** |
| Quarto 2 | 10,10m² | | | | 51 | ≤ 60 | - 9 | ✓ |