



SIMULAÇÃO NÚMERICA DE ACÚSTICA E TÉRMICA EM PAREDES DE AÇO LEVE

Renann dos Santos Lima

Dissertação apresentada ao curso de **Engenharia Industrial** - Ramo Mecânica
para obtenção do Grau de Mestre.

Bragança

2022



SIMULAÇÃO NÚMERICA DE ACÚSTICA E TÉRMICA EM PAREDES DE AÇO LEVE

Renann dos Santos Lima

Dissertação apresentada à **Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança** para obtenção do Grau de Mestre em **Engenharia Industrial** - Ramo Mecânica. No âmbito da Dupla Diplomação com a **Universidade Tecnológica Federal do Paraná**.

Trabalho orientado por:

Prof. Doutor Carlos Alberto Rodrigues Andrade

Prof. Doutor Giovanni Bratti

“A escada do sucesso é melhor escalada pisando nos degraus da oportunidade”

Ayn Rand

Dedicatória

Aos meus pais, Luciane e Adenilson, meu irmão, Otávio, e minha namorada, Jakeline.

Agradecimentos

Sou grato, primeiramente, a Deus, por sempre ter proporcionado feitos incríveis em minha vida e me dar forças para seguir nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos meus pais, Adenilson e Luciane, e meu irmão, Otávio, por tornarem possíveis meus objetivos e contribuírem para se tornar realidade, auxiliando nas decisões e me apoiando em todos os momentos da vida, me inspirando, a cada dia, a ser uma pessoa melhor.

Agradeço a minha companheira, Jakeline, por auxiliar em todos os momentos, ser compreensiva, atenciosa e me acompanhar em cada etapa desse processo. Se fez presente em momentos bons e ruins neste período e, com toda calma e paciência, sempre me proporcionou uma luz para continuar.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Carlos Andrade, pela forma amigável que sempre me recebeu, por toda a orientação, discussões e novas ideias durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também, ao Professor Doutor Giovanni Bratti, que conheci nos meus últimos semestres de estudo na UTFPR, mas muito me auxiliou durante todo tempo que trabalhamos juntos em disciplinas e projetos.

Agradeço a todos os amigos que conheci durante a minha graduação na UTFPR, passando momentos felizes e, também, dificuldades em várias situações, mas sempre mantendo a cabeça erguida. Amizade é um grande alicerce para a vida. E, finalmente, gostaria de agradecer aos amigos que fiz durante o período do mestrado, principalmente aqueles com que passei maior parte deste tempo, Amanda, Dalila, Maria Eduarda, Lucas e Pedro e muitos outros. Estes foram fundamentais para tornar o intercâmbio cada dia melhor e me proporcionar experiências únicas. Levarei todos para a vida.

Resumo

A construção em estrutura de aço leve (LSF) ganhou espaço nos últimos anos na Europa como uma alternativa mais eficiente e barata que a construção convencional, ainda atingindo altos padrões. No entanto, o efeito de pontes térmicas causado pela alta condutividade térmica da estrutura de aço pode ser uma desvantagem. Perda de calor em excesso ou isolamento acústico deficiente estão relacionados ao comportamento do envelope de edifícios. Portanto, no projeto destes sistemas é necessária uma grande atenção em termos de desempenho térmico e acústico, para dar aos ocupantes o conforto desejado. Neste trabalho, a influência da estrutura de aço, do material de vedação e da densidade e espessura do material isolante no desempenho de isolamento térmico e acústico do LSF paredes internas são estudadas. O comportamento do isolamento acústico e térmico são avaliados com recurso de *softwares*, nomeadamente INSUL e THERM, respetivamente. As avaliações foram feitas utilizando o índice ponderado de redução de som, R_w , e o valor U. Com este trabalho pretende-se fornecer orientações que possam contribuir para um dimensionamento eficaz de paredes internas em LSF. Verificou-se que para o bom isolamento acústico, o elemento de vedação é o principal componente e para o bom isolamento térmico, a espessura do material isolante e do elemento de vedação são os principais fatores. Do modelo mais simples ao mais robustos verificou-se reduções da ordem de 33% do valor de R_w e 80% do valor U.

Palavras chave: *lightweight steel framing*, eficiência térmica, eficiência acústica, isolamento de paredes.

Abstract

Light Steel Frame construction (LSF) has gained ground in recent years in Europe as a more efficient and cheaper alternative to conventional construction, still reaching high standards. However, the thermal bridging effect caused by the high thermal conductivity of the steel structure can be a disadvantage. Excessive heat loss or poor sound insulation are related to the behavior of the building envelope. Therefore, in the design of these systems, great attention is needed in terms of thermal and acoustic performance, in order to provide the occupants with the desired comfort. In this work, the influence of the steel structure, the sealing material and the density and thickness of the insulating material on the thermal and acoustic insulation performance of LSF internal walls are studied. The behavior of acoustic and thermal insulation is evaluated using software, namely INSUL and THERM, respectively. The evaluations were made using the weighted sound reduction index, R_w , and the U value. With this work it is intended to provide guidelines that can contribute to an effective design of internal walls in LSF. It was found that for good acoustic insulation, the sealing element is the main component and for good thermal insulation, the thickness of the insulating material and the sealing element are the main factors. From the simplest to the most robust models, reductions of the order of 33% of the R_w value and 80% of the U value were verified.

Keywords: *lighweight steel framing*, thermal performance, acoustic performance, wall insulation.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 VISÃO GERAL	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	3
2 EFICIÊNCIA EM EDIFÍCIOS	4
2.1 INTRODUÇÃO	4
2.2 ACÚSTICA DE CONSTRUÇÕES	5
2.3 TÉRMICA DE CONSTRUÇÕES	7
3 LSF - LIGHT STEEL FRAMING	10
3.1 INTRODUÇÃO	10
3.2 ESTRUTURA METÁLICA.....	12
3.3 OSB, LÃ MINERAL, PLACAS DE GESSO CARTONADO E ETICS	14
3.4 COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE PAREDES DE FACHADA DE LSF. 16	
3.4.1 ATENUAÇÃO DE RUÍDOS EM PAREDES DE LSF	20
3.5 COMPORTAMENTO TÉRMICO DE PAREDES DE LSF	21
4 AVALIAÇÃO	24
4.1 ACÚSTICA – ÍNDICE PONDERADO DE REDUÇÃO DE SOM	24
4.2 TÉRMICA – TRANSMITÂNCIA TÉRMICA OU COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	26
5 MATERIAIS E MÉTODOS	28
5.1 GEOMETRIAS	28
5.1.1 THERM	28
5.1.2 INSUL	31
5.2 MATERIAIS	36

5.3 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E PRECISÃO	37
5.4 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.....	38
5.5 CAMADAS DE AR.....	39
5.6 PRECISÃO.....	39
5.6.1 THERM.....	39
5.6.2 INSUL.....	40
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
6.1 EFICIÊNCIA TÉRMICA.....	44
6.2 EFICIÊNCIA ACÚSTICA - R_w	48
6.3 EFICIÊNCIA ACÚSTICA - R_w+C_{TR}	53
EFICIÊNCIA ACÚSTICA E TÉRMICA.....	55
7 CONCLUSÃO	57
7.1 CONCLUSÃO.....	57
7.2 Proposta de trabalhos futuros.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

Acrônimos

IEQ - *Indoor Environmental Quality*

ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

EPBD - *Energy Performance of Building Directive*

LSF - *Light Steel Framing*

nZEBs - *Nearly zero-energy buildings*

R - Índice de redução de som

R_w - Índice de redução de som aparente ponderado

U - Transmitância térmica ou coeficiente global de transferência de calor

Lista de tabelas

Tabela 1: Condutividade térmica (λ), módulo de elasticidade (E), densidade (ρ), Poisson (ν) e amortecimento interno.....	37
Tabela 2: Parâmetros utilizados nas simulações.	41
Tabela 3: Siglas perfis e densidades nos gráficos.	41
Tabela 4: Resultado simulações.	42

Lista de figuras

Figura 1: Relação entre acústica, ruído e saúde [23].	6
Figura 2: Tipologia paredes de LSF [86].	11
Figura 3: Perfis comerciais vendidos pela Arcelor Mittal [42].	12
Figura 4: Fixação utilizando parafusos e rebites entre painéis [43].	13
Figura 5: Fixação utilizando parafusos, pregos e rebites, respectivamente, entre painel-perfil [43].	13
Figura 6: Painel de lã de rocha com resistência térmica que varia conforme espessura. Adaptado Rockwool [49].	15
Figura 7: Sistema ETICS. APFAC manual ETICS 2018 [52].	16
Figura 8: Transmissão de som de impacto em paredes de LSF [43].	17
Figura 9: Fatores que influenciam na absorção de som de componentes estruturais com cavidade. Adaptado [43].	18
Figura 10: Perfil Knauf MW Metal otimizado para isolamento acústico de paredes [54].	19
Figura 11: Valor do isolamento acústico para parede com uma camada de gesso cartonado, com duas camadas e 4 camadas em quadros de metal separados e material isolante na cavidade [55].	20
Figura 12: Barras resilientes horizontais separando os perfis verticais das placas de aço dos painéis de gesso [55].	21
Figura 13: Caminhos genéricos de transferência de calor. Adaptado [5].	22
Figura 14: Visão geral dos descritores ISO 717 para avaliação de isolamento acústico entre salas em edifícios. Adaptado [64].	25
Figura 15: Perfil em C e perfil acústico [mm].	28
Figura 16: Modelo para perfil em C com duas placas de gesso e isolante de espessura total 100 mm.	29

Figura 17: Modelo para perfil em C com duas placas de gesso e isolante de espessura total 50 mm.	29
Figura 18: Modelo para perfil em C com duas placas de gesso e isolante de espessura total 10 mm.	29
Figura 19: Perfil escalonado [mm].	30
Figura 20: Modelo para perfil escalonado com duas placas de gesso e isolante de espessura total 100 mm.	30
Figura 21: Modelo para perfil escalonado com duas placas de gesso e isolante de espessura total 50 mm.	31
Figura 22: Modelo para perfil escalonado com duas placas de gesso e isolante de espessura total 10 mm.	31
Figura 23: Perfil em C e uma placa de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.	32
Figura 24: Perfil em C e duas placas de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.	32
Figura 25: Perfil em acústico e uma placa de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.	33
Figura 26: Perfil em acústico e duas placas de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.	33
Figura 27: Perfil em C escalonado e uma placa de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.	34
Figura 28: Perfil em C escalonado e duas placas de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.	34
Figura 29: Perfil em C com barra resiliente horizontal e uma placa de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.	35
Figura 30: Perfil em C com barra resiliente horizontal e uma placa de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.	36
Figura 31: Resistência da superfície interna (R_{si}) a 20 °C e externa (R_{se}) a 10 °C [82].	38
Figura 32: Resultados valor U.	44
Figura 33: Diferença absoluta do valor U entre o número de placas de gesso.	46
Figura 34: Valor médio de U para cada perfil.	46

Figura 35: Diferença absoluta do valor U entre densidades.....	47
Figura 36: Linhas de mesma temperatura no modelo com perfil acústico, duas placas de gesso e isolamento total de 50 mm.....	48
Figura 37: Interface INSUL.....	48
Figura 38: Resultados Rw.	49
Figura 39: Erro absoluto entre o 1 e 2 de placas de gesso.	50
Figura 40: Rw para os modelos de 1 placa de gesso.....	50
Figura 41: Rw para os modelos de 2 placas de gesso.....	51
Figura 42: Média Rw entre modelos D30 e D70 em cada espessura de material isolante.	52
Figura 43: Diferença absoluta do Rw entre modelos D30 e D70.....	52
Figura 44: Valores Rw+Ctr.	53
Figura 45: Redução do Rw ao somar o termo de adaptação Ctr.	54
Figura 46: Valor Ctr.	55
Figura 47: Rw+Ctr e Valor U.	56

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será feita uma breve introdução sobre a União Europeia e o conforto e eficiência acústica e térmica de edifícios. Na sequência, serão apresentados os objetivos e a estrutura desta dissertação.

1.1 VISÃO GERAL

Nos últimos anos, houve um aumento da conscientização pública sobre os efeitos do ambiente interno no conforto das pessoas e saúde. O *Indoor Environmental Quality* (IEQ), isto é, a qualidade ambiental interna, é definida pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) [1] como “uma experiência percebida do ambiente interno do edifício que inclui aspectos de projeto, análise e operação de edifícios energeticamente eficientes, saudáveis e confortáveis”. Esta experiência é percebida em diferentes domínios do conforto, como a acústica e térmica, por exemplo.

A respeito do conforto acústico, sons considerados indesejados, ou seja, ruído, podem ser considerados “desperdícios” a serem reduzidos através do isolamento acústico [2]. Compreender como o ruído pode ser irritante ou desejável para os ocupantes do edifício requer uma caracterização perceptiva dos estímulos acústicos. Afim de atender esse objetivo, pesquisa na área acústica evoluiu para os aspectos psicológicos, (psico) acústicos, fisiológicos e fatores sociais para explorar como as pessoas percebem e experimentam o ambiente acústico. Os modelos relativos a QAI são tradicionalmente baseados na medição objetiva de níveis de pressão sonora (decibéis). Um dado importante relativo ao conforto acústico em edifícios é que pessoas passam até 90% de seu tempo dentro de imóveis, então a qualidade do ambiente interior tem um impacto significativo na qualidade de vida [3]. De acordo com a Organização Mundial da Saúde, o efeito da poluição sonora na saúde humana vem numa crescente [4]. É estimado que cerca de 65% dos cidadãos Europeus estarão até 2020 expostos a níveis excessivos de ruído, o qual tem efeitos adversos a saúde [5]. Ruídos também podem ser associados ao aumento da pressão arterial [6]. De acordo com Auger [7], a exposição ao ruído ambiental está associada a

um maior risco de hipertensão. Foraster [8], verificou que a exposição prolongada ao ruído ferroviário, especialmente em ambientes com ruído intermitente, bem como eventos de ruído noturno, principalmente ligados ao ruído rodoviário, podem prejudicar a rigidez arterial, que é um dos principais fatores de doenças cardiovasculares.

No que diz respeito ao conforto térmico de edifícios, que está diretamente ligado a eficiência energética destes, atualmente cerca de 75% do parque imobiliário da União Europeia é ineficiente em termos de energia [9]. O que significa que a maior parte da energia utilizada é desperdiçada; e tal desperdício pode ser reduzido através de otimizações dos imóveis existentes e pela utilização de novos processos e materiais em novas construções.

No início da última década a Comissão Europeia publicou primeiro instrumento legislativo com foco em aperfeiçoar a utilização de energia por imóveis: o “*Energy Performance of Building Directive*” (EPBD) que foi publicado em 2002, atualizado em 2010 e revisado em 2018 [10]. O documento visa promover a melhoria do desempenho energético dos imóveis na União Europeia, tendo em consideração as condições climáticas exteriores, locais e requisitos de clima interior. Um dos objetivos é obter ‘*nearly zero-energy buildings*’ (nEZBs), apresentado em seu Artigo 9, que é definido como um edifício que tem uma eficiência energética muito alta e tem um balanço entre consumo e produção energética próximo de zero.

Nas últimas décadas muitas alternativas a forma tradicional de construção foram desenvolvidas; neste cenário o uso de *Light Steel Framing* (LSF) cresce a cada ano e tem potencial para atingir altos padrões em relação ao desempenho de edifícios. Isto devido a certas vantagens, como: pouco peso com alta resistência mecânica, velocidade de construção, grande potencial de reciclagem e reaproveitamento, alta flexibilidade arquitetônica para fins de *retrofitting*, fácil pré-fabricação permitindo a construção modular, adequada à economia de produção em massa, etc [11]. No entanto, a alta condutividade térmica do aço utilizado no LSF pode levar a pontes térmicas e acústicas significativas, as quais aumentam a transferência de calor e reduzem o isolamento acústico do envelope da construção e prejudicam sua eficiência. Outro ponto importante onde o LSF pode vir a atender expectativas, além do conforto térmico, é o conforto acústico.

Em suma, melhorar ao mesmo tempo o isolamento acústico e térmico de imóveis é de suma importância; visto que um *design* deficiente pode ter impacto significativo nos que utilizam o ambiente.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação é analisar os impactos dos materiais utilizados em paredes de *Light Steel Framing* [LSF] em sua eficiência acústica e térmica utilizando simulações numéricas. Estas simulações serão divididas em duas partes: a primeira, uma análise numérica acústica de três dimensões com quatro tipos de perfis de estruturas LSF, utilizando três espessuras e duas densidades diferentes de material isolante utilizando o software INSUL, e a segunda, uma análise numérica térmica de duas dimensões dos mesmos sistemas, exceto para o sistema com barra resiliente, utilizando o *software* THERM. A partir dos resultados das simulações, estes serão comparados e verificado o modelo e parâmetros onde o isolamento acústico é maximizado, enquanto a eficiência do isolamento térmico é mantido.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento será organizado em seis capítulos.

No primeiro, a Introdução, onde são feitos as considerações iniciais, motivação e objetivo do trabalho. No segundo e terceiro capítulo é apresentado a bibliografia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, assim como uma revisão de trabalhos relevantes sobre o desempenho térmico e acústico de edifícios e LSF. No quarto uma definição dos índices que serão utilizados para a avaliação dos modelos simulados.

No quinto parágrafo é apresentado uma revisão dos materiais, métodos e considerações utilizados para as simulações. No sexto os resultados são discutidos.

No sexto, e último parágrafo, é apresentado as conclusões obtidas.

2 EFICIÊNCIA EM EDIFÍCIOS

2.1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética é reconhecida como uma das prioridades da *Energy Union*, que visa construir uma união energética que proporcione aos consumidores da UE - famílias e empresas - energia segura, sustentável, competitiva e acessível [12]. Existem vários tipos de eficiência, como a térmica e a acústica que serão abordadas neste trabalho, ambas podem atingir níveis mais elevados de várias formas, uma delas é a utilização de envelopes de alta eficiência [13]. Este quando aliado a outras estratégias passivas, reduz a necessidade de sistemas de aquecimento, arrefecimento e ventilação; isto é, reduzindo gastos com energia elétrica e aumento do conforto percebido.

Um envelope de construção é o que separa o ambiente externo do interno de um imóvel, como: paredes, fundação, isolamento térmico, isolamento acústico, janelas, etc [14]. Este é um fator chave para a eficiência energética e conforto acústico do imóvel. A eficiência do envelope define quanto calor será perdido ou ganho através dele, e esta taxa de transferência de calor está associado ao coeficiente global de transferência de calor (valor U) do elemento, o qual depende das propriedades dos materiais que compõem o elemento, e estes afetam diretamente a eficiência acústica da parede [15].

Deste ponto de vista, alternativas como o LSF, por exemplo, emergiram nos últimos anos principalmente devido a suas vantagens em relação aos sistemas tradicionais de construção. Este método vem sendo utilizado em países como Estados Unidos, Austrália, Nova Zelândia e em países da Europa [16]. No entanto, do ponto de vista do conforto acústico, devido à baixa massa e conexões rígidas de aço entre o revestimento interno e externo pode significar um baixo desempenho acústico. Portanto, ruídos aéreos ou de impacto devem ser levados em consideração ainda durante as fases de projeto e construção [17].

De acordo com a EN 16309: 2013 [18], “Características acústicas” são questões que devem ser consideradas na avaliação de desempenho social de edifícios no capítulo “Saúde e conforto”. As “Características térmicas” também estão incluídas na avaliação da categoria de desempenho social “Saúde e conforto”, com o desempenho térmico do envelope tendo uma influência significativa. Em geral, a eficiência energética

e o isolamento acústico de edifícios são dois aspectos relevantes que devem ser levados em consideração para se alcançar altos padrões de desempenho social, econômico e ambiental dos edifícios.

2.2 ACÚSTICA DE CONSTRUÇÕES

A Acústica é a ciência que estuda o som, a sua propagação tanto em meio fluido como sólido, e as suas inter-relações com o ser humano numa perspectiva de efeitos causados, tenham eles carácter de agradabilidade (música, voz) ou não (ruído) [19]. O som sempre fez parte da vida. No entanto, na sociedade moderna, a maioria dos sons são entendidos de forma confusa pelos ouvintes, ou seja, ofensivos e desprovidos de conteúdo informacional, definidos neste caso como ruído. Por esta evidência se constata que o ruído, como “subconjunto” do som, não depende somente das suas características físicas (amplitude, frequência e duração) mas também da atitude que o ser humano tem relativamente à sua percepção [20].

Embora o ruído seja um fenómeno subjetivo e fortemente relacionado à percepção individual, pesquisas, realizadas em diferentes países europeus, e resumidos por Lang [21], mostram situações acústicas excessivas para um número significativo de habitantes. Números da Comissão Europeia indicam que mais de 100 milhões de pessoas são expostos a níveis de som excessivos com diferentes efeitos resultantes, como deficiência auditiva, hipertensão, doenças de coração, aborrecimento e perturbação do sono. Considerando a importância deste tópico para a saúde e bem-estar, proteções a ruído tornaram-se um indicador importante para os aspectos de sustentabilidade social de construções.

A partir da crescente preocupação com a qualidade de vida, e com o aumento dos níveis de ruído, principalmente nos grandes centros urbanos, o problema da poluição sonora e proteção sonora das edificações torna-se parâmetros de projeto cada vez mais importantes. A Figura 1 mostra, de acordo com a EN 16309:2014 [18], a ligação entre as características acústicas com conforto e saúde e entre ruído e impactos à vizinhança. Em geral, a minimização dos efeitos negativos do ruído pode ser atingida através da redução do nível de ruído emitido, tratado no meio de transmissão e/ou a proteção direta do receptor [22].

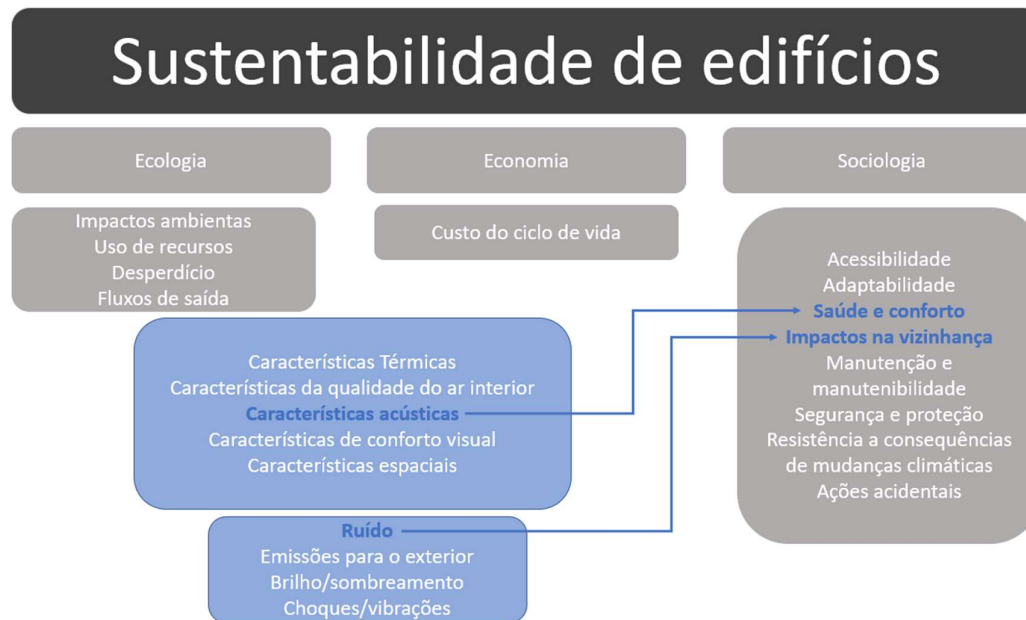


Figura 1: Relação entre acústica, ruído e saúde. Adaptado [23].

Nesse contexto, foram publicadas diretivas e normas europeias, as quais contribuíram para o surgimento de novos documentos legais em Portugal sobre a prevenção e controle do ruído e conforto acústico no interior dos edifícios, tal como o Regulamento Geral de Ruído (RGR) [24] e complementos ao RGR, como: Regulamento de Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), que visa a melhoria das condições de qualidade acústica dos edifícios; Regulamento da Emissões Sonoras e Equipamentos para Utilização no Exterior (RESEUE), relativo ao controle sonoro dos equipamentos para utilização no exterior dos edifícios; Decreto-Lei nº182/2006, de 6 de Setembro, em relação ao ruído em locais de trabalho; entre outros.

De acordo com a EN 16309:2014 [18], as características acústicas são definidas por: isolamento de paredes e chãos de sons que são transmitidos pelo ar e sons de impacto, o isolamento acústico do envelope externo, o nível de ruído de equipamentos, e o tempo de reverberação. Especificamente sobre ruído, a EN16309:2014 [18] ainda sugere que a pressão do som emitido seja medida em dB(A) e que os seguintes aspectos de construção podem ser utilizados para potencial controle de ruídos: isolamento acústico e barreiras de som. A qualidade acústica de um edifício pode ser determinada por cálculo

usando a série de normas EN ISO 12354-1:2017 [25], ou por meio de medições em laboratórios ou *in situ*. O desempenho acústico do edifício pode variar muito com a qualidade do acabamento e a situação real encontrada, e as medições de laboratório dependem da precisão do teste.

A maioria dos países da Europa tem regulamentos de ruído para casas, incluindo requisitos para isolamento acústico de ruídos aéreos e de impacto entre casas, expressos utilizando índices encontrados na ISO 717-1:2013 [26]. Quase todos os requerimentos se aplicam a faixa de frequência padrão, iniciando-se em 100 Hz. Além dos regulamentos, existem sistemas nacionais de classificação acústica para residências em mais de dez países da Europa. Os programas atribuem várias classes de qualidade, que refletem diferentes níveis de proteção sonora e incluem critérios de classificação para várias áreas de desempenho acústico. Os índices utilizados pela ISO 717-1:2013 [26] serão explicados no capítulo referente aos índices utilizados para avaliação acústica.

2.3 TÉRMICA DE CONSTRUÇÕES

O comportamento térmico de um material explica como ele interage, no sentido térmico, com seus envolventes e é determinado por sua capacidade de trocar energia térmica com o ar circundante a uma temperatura ambiente quase constante [27]. Tanto o calor sensorial tátil humano quanto o comportamento térmico dos materiais podem influenciar a experiência térmica em um ambiente [28]. Portanto, a escolha dos materiais de construção determina as experiências térmicas dos seus envolventes e implica que a seleção do material influencia o consumo de energia; assim afetando os níveis de conforto e, portanto, a necessidade de aquecimento ou arrefecimento [28].

O EPBD não descreve métodos de cálculo de balanço energético ou abordagens para a implementação de nEZBs e requer que cada Estado Membro defina seus planos de ação de acordo com suas condições nacionais, regionais e locais. No entanto, em seu Anexo I, é apresentado um panorama geral dos parâmetros que devem ser utilizados para calcular a eficiência energética de um edifício, tais como: capacidade térmica das partes internas, isolamento, aquecimento passivo, pontes térmicas, elementos de arrefecimento, etc.

Uma melhor eficiência energética de imóveis pode ser atingida através da implementação de estratégias ativas, como sistemas de aquecimento, ar condicionado e ventilação, ou através de estratégias passivas com foco na melhoria do envelope de construção, como o isolamento das paredes e janelas [14]. Estratégias passivas como a utilização de luz e ventilação natural, jardins interiores e de coberturas, isolamentos etc, são tecnologias mais eficientes energeticamente, pois seus processos ocorrem de forma natural.

A eficiência do envelope depende do *(i)* nível de isolamento das paredes, teto e outros elementos de vedação; *(ii)* das propriedades térmicas das janelas e portas; e *(iii)* da estanqueidade do envelope devido a trocas de ar por vazamentos [29]. Grande parte da energia perdida por um edifício é devido a condução através de seu envelope [30] e sua capacidade de transferência de calor pode ser medida e expressa pelo coeficiente global de transferência de calor (valor U), o qual se refere a quantidade de energia transferida por segundo por unidade de área a cada grau de diferença de temperatura entre as faces. Sabendo-se o valor U de um elemento pode-se também prever seu comportamento térmico, e no caso de edifícios, pode-se estimar qual será a energia necessária para atingir o conforto térmico. Portanto, a utilização de um envelope com alta eficiência, baixo valor U, é de suma importância para se atingir nEZBs.

Uma construção recebe calor através da radiação solar e perde, ou ganha, calor para o ambiente exterior por convecção, de acordo com as condições externas. A transferência de calor entre a superfície externa e interna da parede depende do coeficiente global de transferência de calor do envelope da construção. A transferência de calor entre a parede exterior e interior ocorre em grande parte por condução e o equilíbrio térmico entre a superfície interna e o ambiente interno da construção é determinado pela radiação térmica e transferência de calor por convecção da superfície interior.

As características térmicas dinâmicas dos componentes de construções são influenciadas por vários parâmetros, os quais podem ser categorizados como parâmetros ambientais (temperatura do ar ambiente, fluxo de calor solar, ventilação, etc.), parâmetros de projeto (orientação, absorvidade, emissividade, etc.) e propriedades termo físicas para uma determinada construção localizada em um local específico [31-33]. Estes também indicam que a espessura e a posição do isolamento no envelope têm um grande efeito no ganho ou perda de calor; e estas por sua vez, dependem fortemente de suas

características físicas como: condutividade térmica, calor específico, densidade, espessura e difusividade térmica.

Para o cálculo de cargas térmicas no regime transiente, as propriedades dinâmicas dos envelopes da construção devem ser avaliadas. Estas utilizam os seguintes parâmetros para cálculo da capacidade armazenamento de calor: (i) *time lag* (φ) e (ii) fator de decréscimo (f). O primeiro representa a variação de tempo entre o pico de temperatura nas faces internas e externas de paredes e segundo é a razão entre a amplitude da temperatura da superfície interna e externa [34]. Estas dependem da capacidade térmica, condutividade térmica, espessura e coeficiente de transferência de calor por convecção em ambas faces [35]. No entanto, as simulações deste trabalho se darão no regime estacionário e as implicações do regime transiente não serão levadas em consideração.

O aumento do coeficiente global de transferência de calor, da inércia térmica e a correção de pontes térmicas são abordagens que podem ser utilizadas para se obter um envelope mais eficiente. A redução da transmitância térmica, ou coeficiente global de transferência de calor, se dá pelo aumento da resistência na condução de calor na parede e pode ser atingido pelo uso de materiais isolantes. Pontes térmicas não serão abordadas neste trabalho, seu efeito será considerado no valor U da superfície inteira. No entanto, vários autores [5][36-38] já analisaram e quantificaram seus efeitos, bem como propuseram algumas formas de reduzir seus efeitos.

3 LSF - LIGHT STEEL FRAMING

3.1 INTRODUÇÃO

É um sistema de construção a seco caracterizado por uso de perfis de aço enformados a frio para construir painéis pré-fabricados ou para serem montados diretamente no local. Quando comparado a construção convencional, a construção com estrutura de aço leve (LSF) oferece uma série de vantagens, como: (i) montagem rápida, (ii) leve, (iii) alta resistência mecânica, (iv) melhor controle de qualidade, (v) alta flexibilidade arquitetônica, (vi) adequado para produção em massa, (vii) ótimo potencial para reciclagem e reutilização, (viii) menor quantidade de resíduos no local, (ix) resistência a danos por insetos, (x) menor distúrbio da vizinhança durante a construção, (xi) perfis de aço não são sensíveis a atividade biológica (fungos, mofos), etc [5].

Uma parede LSF básica é composta por três partes: (i) estrutura interna da estrutura de aço (perfis enformados a frio), (ii) painéis de revestimento (camadas internas e externas) e a (iii) cavidade de isolamento que pode ser preenchida com material de isolamento ou vazio. A existência de uma camada de isolamento e sua posição na parede determinam o tipo de parede de construção LSF.

No que compete ao desempenho térmico, elementos LSF, como paredes de fachada, podem ser classificados em três tipologias, dependendo da posição de isolamento: construção de quadro frio, quente e híbrido [5], a Figura 2 ilustra essas tipologias, bem como a composição mais comum de componente. Estes são: poliestireno expandido (EPS), geralmente incorporado ao sistema composto de isolamento térmico externo (ETICS), *oriented strand board* (OSB), lã de rocha (RW) e gesso cartonado.

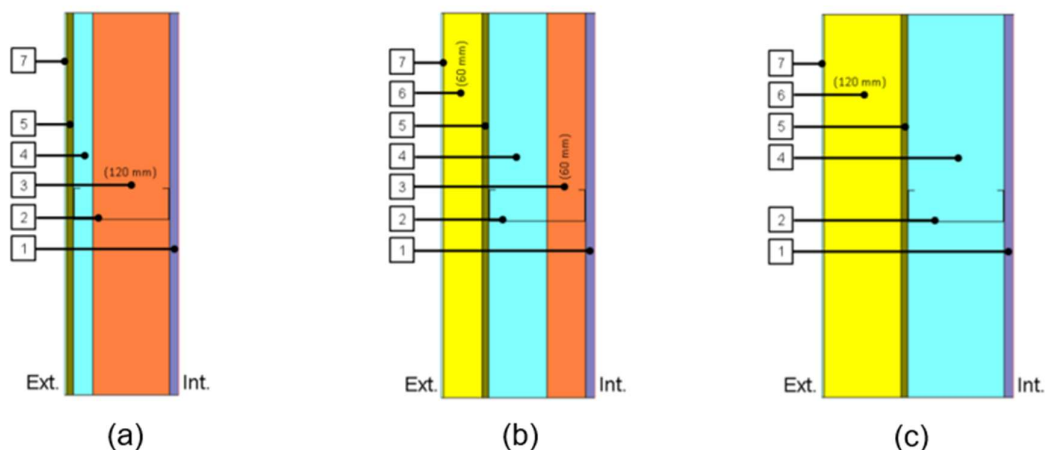


Figura 2: Tipologia paredes de LSF [86].

onde: 1- Gesso; 2- LSF; 3- Lã mineral; 4- Cavidade de ar; 5- OSB; 6- EPS; 7- ETICS.

Na construção a frio (Figura 2 (a)), a totalidade do isolamento aplicado, geralmente um material fibroso para melhorar o desempenho acústico, é colocado dentro da cavidade de ar da parede e limitado a espessura da estrutura de aço, a qual perfura esta camada de isolamento e, portanto, o isolamento não é contínuo. Este possui o pior desempenho térmico dos três devido à falta de isolamento na parede externa e pontes térmicas criadas pelos perfis de aço.

O contrário acontece na construção da moldura quente (Figura 2 (c)), onde a totalidade do isolamento térmico, que é contínua, e localizada fora da estrutura de aço, isolando as baixas temperaturas externas e resultando em uma temperatura do quadro mais próxima das temperaturas internas. Esta tipologia de construção tem o melhor desempenho de isolamento térmico.

O tipo de construção híbrida (Figura 2 (b)) é uma solução intermediária entre a construção fria e quente e tem ambos os tipos de isolamento aplicados: fora e dentro da parede. Devido a seu isolamento contínuo, usado no tipo de estrutura quente, quanto maior a espessura e qualidade do isolamento externo, melhor será o desempenho térmico da parede.

3.2 ESTRUTURA METÁLICA

Este dará estabilidade e suportará as cargas aplicadas. É formada por perfis de aço conformado a frio e fixadores. Devido ao aço, esta estrutura possui uma ótima relação resistência/peso. Os perfis utilizados tem diversas espessuras que variam de 1.2 mm à 2.5 mm de espessura e são fabricados conforme a norma EN 1993-1-3 [39] do Eurocódigo 3. Para evitar corrosão o aço normalmente é galvanizado conforme EN 10326:2004 [40].

Os perfis podem ser fabricados com seções transversais em forma de U, C, Z, Σ , *top-hat* e I (Figura 3), sendo os mais comuns os três primeiros, de aços estruturais como: S235, S275 e S355 e espaçamento médio entre as vigas de 400 mm à 600 mm. [41]. A largura comumente encontrada comercialmente varia de 90 mm, comumente paredes internas, à 250 mm [42].



Figura 3: Perfis comerciais vendidos pela Arcelor Mittal [42].

O método de fixação dependerá do: tipo e espessura dos materiais que serão conectados, condições de cargas e força de conexão requerida, disponibilidade de ferramentas, custo, durabilidade, etc. [43]. A Figura 4 e 5 ilustram, respectivamente, alguns modos de fixação entre perfis e entre perfil-painel.

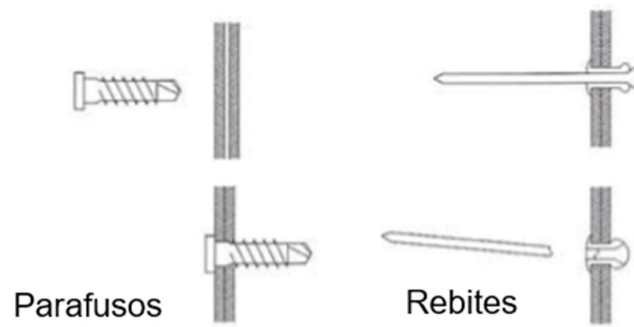


Figura 4: Fixação utilizando parafusos e rebites entre painéis [43].

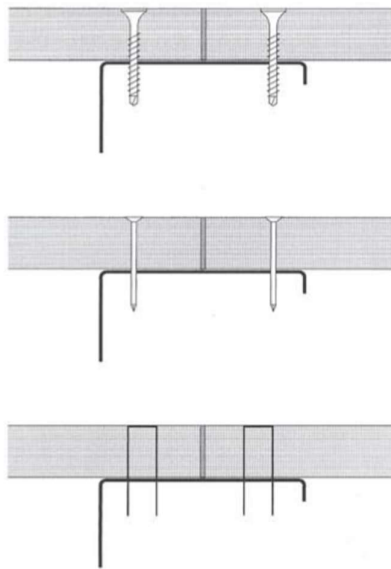


Figura 5: Fixação utilizando parafusos, pregos e rebites, respectivamente, entre painel-perfil [43].

O método mais usual são parafusos, que quando comparados a pregos, provém uma conexão muito mais forte e duradoura, além de serem mais práticos e rápidos na construção [5].

3.3 OSB, LÃ MINERAL, PLACAS DE GESSO CARTONADO E ETICS

Oriented Strand Board (OSB) é produzido a partir de filamentos de madeira em camadas perpendiculares de cerca de 100 mm de comprimento, secas e misturadas com cera e resinas, estas são prensadas a altas temperaturas [44]. O produto final é um painel denso, resistente e durável. Vale ressaltar que a madeira utilizada no processo provém de árvores de crescimento rápido e possui um alto rendimento industrial, o que torna estas placas economicamente atrativas e sustentáveis [41]. Na construção civil, as dimensões das placas normalmente utilizadas no sistema LSF possuem 1200 mm de largura, entre 2400 mm e 3000 mm de comprimento e espessuras de 6, 9, 11, 15, 18 e 22 mm [45]. Há quatro classes de OSB, o qual é definido na norma EN 300:2019 [46] de acordo com suas capacidades mecânicas e resistência relativa à umidade:

- OSB/1 – Placas de uso geral e placas para ambientes internos (incluindo móveis) para uso em condições secas;
- OSB/2 – Placas para fins estruturais em condições secas;
- OSB/3 – Placas para fins estruturais em ambientes úmidos;
- OSB/4 – Placas de suporte de carga pesada para uso em condições úmidas.

A lâ mineral é produzida principalmente a partir de vidro, escórias e rochas ígneas como basalto e diabásio. Resíduos de vidro são adicionados como matéria-prima secundária [47]. Estes produtos são levados a temperaturas de fundição de até 1650 °C, são transformadas em filamentos e adicionado resina para formar um composto próximo a lâ, o material resultante tem ótimo desempenho térmico e acústico, não absorve umidade, não é combustível e é de baixo custo. [48]. Tais características tornam a lâ mineral uma ótima escolha para aplicação no LSF, onde é normalmente aplicada na cavidade entre as paredes externas e internas. Ela é encontrada no mercado em placas e de diversas espessuras (Figura 6) e densidades, o que afeta diretamente sua eficiência acústica e térmica.



Dimensões L x a x e (cm)	Código	Resist. Térmica R=m² K/W
135 x 60 x 4	58553	1,10
135 x 60 x 5	58554	1,35
135 x 60 x 6	58555	1,65
135 x 60 x 8	58556	2,20
135 x 60 x 10	58557	2,75

DENSIDADE NOMINAL
40
Kg/m³

Figura 6: Painel de lã de rocha com resistência térmica que varia conforme espessura. Adaptado Rockwool [49].

O *drywall*, também conhecido como gesso laminado ou cartonado, é um revestimento composto por gesso, água e aditivos. Esta pasta feita da desta mistura úmida é continuamente derramada sobre o papel, formando uma nova camada na superfície superior do papel. Assim um sanduíche de papel e gesso é feito, seco e pode ser cortado em diferentes formatos. Placas de gesso, ou placas de gesso laminado, também vêm em diferentes espessuras e dependendo dos aditivos que recebem, podem ser usadas em diferentes partes da construção, como ambientes úmidos ou aqueles onde é necessária resistência adicional ao fogo [50]. Estas placas são principalmente utilizadas como elemento de vedação da estrutura metálica nas paredes interiores e podem ser fixadas ao OSB ou em si mesmos quando há o uso de duas placas. São elementos de muita praticidade, versatilidade, bom acabamento e de fácil aplicação, além disso, são mais uma barreira acústica e térmica.

ETICS (*External Insulation Composite System*) é um sistema inovador, originalmente desenvolvido para melhorar o isolamento dos edifícios, reduzir os problemas de pontes de calor, problemas de condensação e aumentar a vida útil dos edifícios. Esta solução tem sido utilizada em construções novas, bem como na reabilitação de edifícios existentes para resolver problemas como falta de isolamento, infiltrações de água nas paredes ou deterioração estética das fachadas [51]. Consiste em um conjunto de revestimentos aplicados nas paredes externas do edifício (Figura 7). O sistema é geralmente composto por uma camada de isolamento térmico fixada ao substrato (parede

exterior do edifício) por adesão direta (sistema colado) ou por âncoras mecânicas, sobre as quais é aplicada uma fina camada de base adicionando reforço para fortalecê-lo. É comumente acabado com tinta plástica.

Na imagem abaixo um exemplo de um sistema ETICS, onde: (i) parede exterior do edifício (alvenaria ou OSB), (ii) fixação ao substrato utilizando argamassa de colagem ou parafusos, (iii) placa isolante (normalmente Poliestireno Expandido), (iv) argamassa de revestimento armada com rede de fibra de vidro para conferir resistência mecânica ao revestimento, (v) argamassa niveladora, (vi) primário e (vii) revestimento final (revestimento espesso colorido) [52].

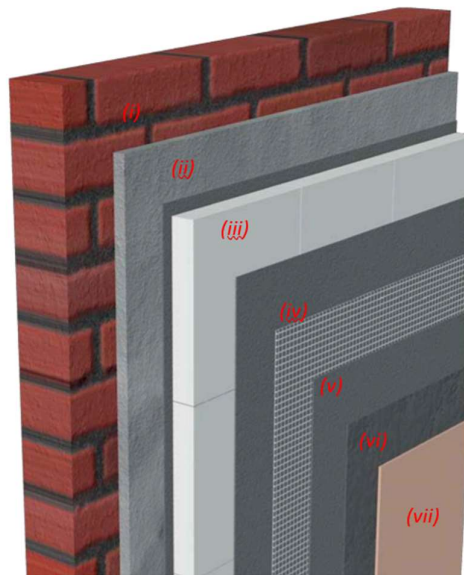


Figura 7: Sistema ETICS. APFAC manual ETICS 2018 [52].

3.4 COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE PAREDES DE FACHADA DE LSF

Construtoras e clientes estão aumentando seu interesse em edifícios com bom isolamento acústico e essa melhoria aumenta os custos em pouco ou até mesmo nada. Para isolamento de sons que se propagam pelo ar ou de impacto, os princípios da acústica para construções secas e leves prevalecem. O isolamento não depende apenas da massa

do material, mas é resultado também da partição e aplicação dos princípios de separação acústica [43].

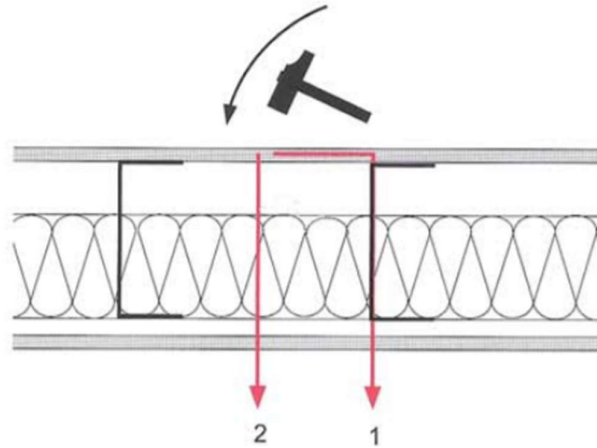


Figura 8: Transmissão de som de impacto em paredes de LSF [43].

Na Figura 8, 1 representa o caminho que as ondas mecânicas se propagam passando diretamente pelos perfis da estrutura (pontes acústicas) e 2 através da reverberação das ondas pelo ar da cavidade.

Se preço, espessura e peso forem levados em consideração, o isolamento acústico de paredes de LSF vedadas com placas de gesso cartonado provém bons resultados (Figura 9). As propriedades acústicas dependem do sistema inteiro: propriedades do material da parede, da estrutura e do isolamento utilizado, espessuras, espaçamentos, método de fixação, etc. Este sistema do ponto de vista da acústica constitui um membro de “casco duplo”.


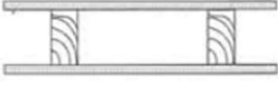
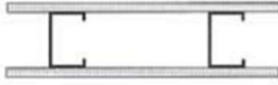
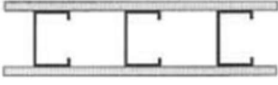
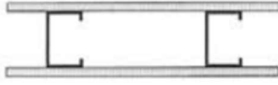
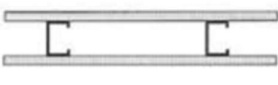

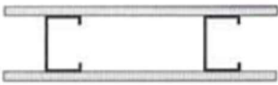


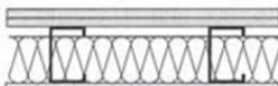
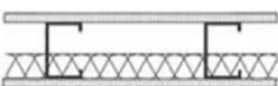
	Melhor	Pior
Tipo de suporte		
Espaçamento entre perfis		
Largura do perfil		
Perfil duplo ou único		
Painéis		
Material isolante		

Figura 9: Fatores que influenciam na absorção de som de componentes estruturais com cavidade. Adaptado [43].

Os fatores que mais afetam o isolamento acústico são [43]:

- a rigidez dos perfis entre as paredes. O modo como os suportes de metal são montados e arranjados, assim como, o modo que os elementos de vedação (gesso cartonado, OSB, etc.) são fixados às vigas de metal afetam este fator;
- o espaçamento entre os perfis;
- a elasticidade dos perfis. Este depende diretamente de sua espessura, material e composição;
- o peso da estrutura em relação a sua área superficial;

- o tipo, as propriedades (melhores absorção de certos comprimentos de onda, por exemplo) e nível de preenchimento do material de isolamento.

Paredes duplas são uma solução comum em estruturas LSF. Elas são normalmente constituídas por meio de duas placas (placas de gesso, placas de madeira ou semelhantes) e alguns tipo de material absorvente colocado dentro da cavidade de ar para melhorar a capacidade de isolamento acústico e térmico do sistema. Afim de satisfazer os requisitos de construção e dar rigidez a parede, vigas de madeira ou aço são utilizados. Estas atuam como pontes de sons entre as duas faces da parede. Essas conexões entre as faces causam a resposta acústica da parede a ser pior que o ideal, pois um novo caminho de transmissão de vibração (além do caminho pelo ar ou da cavidade) é criado. A diminuição do índice de redução de som de paredes duplas depende altamente das propriedades mecânicas (principalmente rigidez) desses elementos de conexão [53].

Na figura abaixo, Figura 10, um perfil otimizado para absorção e dissipação de som, ele pode melhorar a quantidade de isolamento acústico da parede aumentando a “ação de mola” da estrutura e reduzindo a influência das pontes de som [54].



Figura 10: Perfil Knauf MW Metal otimizado para isolamento acústico de paredes [54].

3.4.1 ATENUAÇÃO DE RUÍDOS EM PAREDES DE LSF

De forma simples, o método mais efetivo para prover isolamento acústico a construções em LSF é adicionar múltiplas camadas [55].

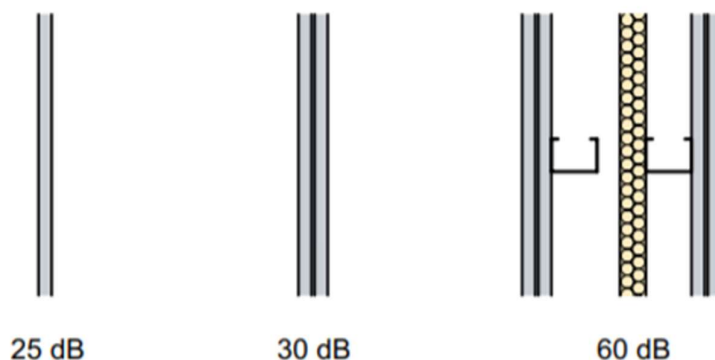


Figura 11: Valor do isolamento acústico para parede com uma camada de gesso cartonado, com duas camadas e 4 camadas em quadros de metal separados e material isolante na cavidade [55].

De acordo com a Associação Europeia de Construção de *Light Steel Framing* [43], para se obter um bom isolamento acústico, alguns critérios e combinações comuns podem ser seguidos, como:

- Utilizar elementos de vedação flexíveis (OSB, gesso cartonado, madeira) com espessura de 20 mm. A massa por unidade de área também tem uma influência positiva na redução de ruído, quanto maior a massa, melhor o isolamento acústico;
- Maior espaçamento entre os perfis verticais;
- Materiais isolantes nas faces dos perfis verticais;
- Material isolante da cavidade de ar. Quando as ondas mecânicas entram em contato com o material, sua energia é convertida em calor. Materiais endurecidos como espumas rígidas não podem ser utilizadas para este propósito;

- Separação do ponto de fixação das placas internas e externas. O perfil entre as duas faces das paredes cria uma ponte acústica entre as placas. Para obter um melhor isolamento, o ponto de fixação de cada face deve ser o mais distante um do outro, utilizando barras resilientes por exemplo (Figura 12), ou idealmente, cada face ter um ponto de fixação (perfil vertical) independente.

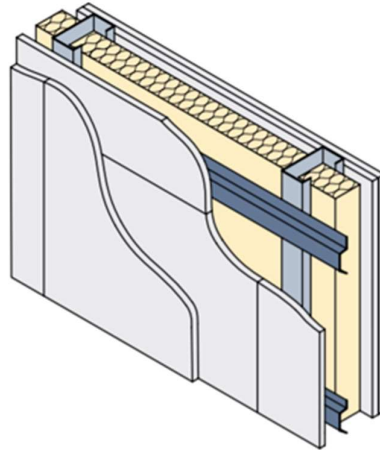


Figura 12: Barras resilientes horizontais separando os perfis verticais das placas de aço dos painéis de gesso [55].

3.5 COMPORTAMENTO TÉRMICO DE PAREDES DE LSF

Um sistema construtivo LSF, embora ofereça grandes vantagens e potencialidades quando trata da sustentabilidade no setor da construção e na obtenção de alto conforto interno níveis, podem apresentar alguns inconvenientes em relação à eficiência energética. Se sua baixa inércia térmica e pontes térmicas criadas pela alta condutividade da estrutura de aço não forem corretamente endereçados durante a fase de design, problemas como superaquecimento durante o verão, grandes flutuações de temperatura e maior energia demandas de aquecimento e arrefecimento podem surgir [56].

Dependendo dos detalhes da construção, desprezar o efeito das pontes térmicas causadas pela estrutura de aço pode levar a uma superestimativa da resistência térmica em até 50% [56]. As pontes térmicas também podem causar patologias

construtivas que reduzem os níveis de conforto e as condições de saúde relacionadas com a ocorrência de fenômenos de condensação [57]. Devido a estrutura de aço, avaliar o desempenho térmico de paredes LSF requer uma análise mais complexa e detalhada do que é necessário para construções de alvenaria. É, portanto, de suma importância levar em consideração a influência da estrutura de aço nas paredes LSF ao avaliar o comportamento térmico real desses elementos [58].

A Figura 13 mostra uma parede híbrida onde dois há dois caminhos por onde há transferência de calor com diferentes resistências térmicas e foram identificados esquematicamente: o caminho através da cavidade (a) e o caminho através da viga de aço (b). Na tipologia de construção a frio, sem uma ruptura térmica significativa fornecida por uma camada de isolamento como nas construções com quadro quente ou híbrido, a viga de aço constitui um caminho contínuo de menor resistência térmica que conecta os ambientes interno e externo. Neste tipo de construção, o fluxo de energia térmica através do caminho da viga e em sua vizinhança é muito maior do que o que cruza o caminho da cavidade [59].

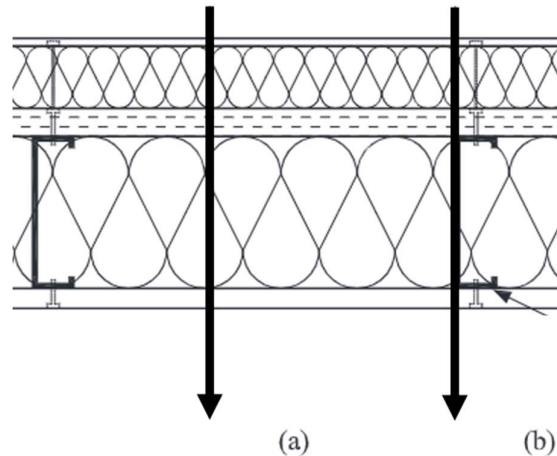


Figura 13: Caminhos genéricos de transferência de calor. Adaptado [5].

Há três tipos de pontes térmicas que podem ser encontrados em construções de LSF: pontes térmicas geométricas (por exemplo, junções onde as paredes se encontram com outros componentes do edifício, incluindo janelas e portas); pontes térmicas isoladas

(por exemplo, varandas ou parafusos que penetram nas camadas de isolamento); pontes térmicas repetidas (por exemplo, a estrutura de aço do edifício) [60].

Algumas estratégias para melhorar a resistência térmica de elementos LSF e mitigar os efeitos das pontes térmicas são: manter a geometria da parede o mais simples possível, evitar a interrupção na camada de isolamento, usar um material de isolamento com a menor condutividade térmica possível sempre que a interrupção da camada de isolamento for inevitável e instalar aberturas, como portas e janelas, em contato com a camada de isolamento [60].

Quando há pontes térmicas, há fluxo de calor em mais de uma dimensão, ao longo das três dimensões da viga de aço por exemplo, e dado o alto nível de heterogeneidade em relação às condutividades térmicas dos materiais compondo elementos LSF (perfis de aço e isolamentos), há grande dificuldade em não apenas para calcular com precisão sua transmitância térmica, mas também para executar de forma precisa e confiável medições, tanto *in-situ* quanto em laboratório, especialmente quando os perfis de aço são colocados em mais de uma direção [15].

Um dos principais objetivos deste estudo é avaliar o comportamento térmico de paredes de LSF. O fluxo de energia térmica através de pontes térmicas geométricas e isoladas, portanto, não está sendo analisado. O efeito de pontes térmicas repetidas é aqui considerado pelo cálculo do valor U geral da parede da fachada de LSF.

4 AVALIAÇÃO

4.1 ACÚSTICA – ÍNDICE PONDERADO DE REDUÇÃO DE SOM

O isolamento acústico de sons aéreos é especificado internacionalmente em geral pelo índice de redução de som R , às vezes referido como *Transmission Loss*, TL. O coeficiente de transmissão de potência sonora τ é definido como a razão entre a potência sonora transmitida e a potência sonora incidente [61]. Como os valores do coeficiente de transmissão são primariamente pequenos, o índice logarítmico de transmissão de som é usado para quantidade de energia transmitida.

$$R = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad [\text{dB}] \quad (4.1.1)$$

Na Europa, o cálculo de isolamento de sons aéreos é regulado pela EN ISO 12354-1:2017 [25]. A norma consiste em dois modelos que descrevem o índice de redução de som aparente ponderado. Um, descrito como o modelo detalhado, é basicamente um procedimento de cálculo dependente da frequência. Se os valores para o índice de redução de som dependem da frequência, o valor em 500 Hz pode ser considerado uma boa aproximação, mas o resultado pode ser menos preciso [25]. O outro modelo é chamado de modelo simplificado. O modelo de cálculo simplificado prevê o índice de redução de som aparente ponderado com base nos índices de redução sonora dos respectivos elementos [62]. Considera a ponderação de acordo com a norma EN ISO 717-1 [26]. O modelo é utilizado para o índice de redução de som aparente ponderado, R_w .

No entanto, cada país Europeu estabelece diferentes graus de requisitos acústicos, segundo Rasmussen [63], através dos descritores de campo básicos (quantidades de número único) e os termos de adaptação de espectro, Figura 14, relatados na ISO 717:2013 [26].

ISO 717:2013 descritores para avaliação de isolamento de sons	Isolamento de sons aéreos entre cômodos (ISO 717-1)	Isolamento de sons de impacto entre cômodos (ISO 717-1)
Descritores básicos (quantidade de números únicos)	R'_w $D_{n,w}$ $D_{nT,w}$	$L'_{n,w}$ $L'_{nT,w}$
Termos de adaptação de espectro (de acordo com aplicação)	Nenhum C $C_{50-3150}$ $C_{100-5000}$ $C_{50-5000}$	Nenhum C_i $C_{i,50-2500}$
Total de descritores	$3 \times 5 = 15$	$2 \times 3 = 6$

Figura 14: Visão geral dos descritores ISO 717 para avaliação de isolamento acústico entre salas em edifícios. Adaptado [64].

Estudos comparativos de requisitos e valores limites na Europa para isolamento acústico em residências são descritos em [63-65].

O “índice de redução de som aparente ponderado”, R_w , é descrito na ISO 717-1:2013 [26], é considerado parâmetro fundamental para a comparação em laboratório de diferentes sistemas construtivos. Este índice considera uma frequência de banda de 1/3 de oitava, entre 100 Hz e 3150 Hz e 125 Hz a 2000 Hz para bandas de oitava, que pode não ser suficiente para uma descrição satisfatória do comportamento em baixas e alta frequência. Para considerar o comportamento, em frequências em relação aos espectros de ruído normalizados (*pink noise* e ruído de tráfego), termos de adaptação de espectro C e *Ctr* foram introduzidos.

Em um campo de som difuso, isto é, a região em uma sala onde o nível de pressão sonora é uniforme, ou seja, o som refletido domina, em oposição à região próxima a uma fonte de ruído onde o som direto domina, a definição do índice R_w é dado pela ISO 10140-2:2010 [66]:

$$R_w = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad [\text{dB}] \quad (4.1.2)$$

onde:

L_1 - Nível médio de pressão sonora de energia na sala de origem [dB];

L_2 - Nível médio de pressão sonora de energia na sala de recebimento [dB];

S - Área da abertura de teste livre na qual o teste elemento está instalado [m²];

A - Área de absorção sonora equivalente na sala de recepção, calculada com a fórmula de Sabine válida apenas em um campo sonoro difuso [m²].

Os termos de adaptação C e C_{tr} são fatores de correção devido a variedade de espectros de sons incidentes, C para a faixa de frequência média (por exemplo, fala) e C_{tr} para a faixa de baixa frequência (por exemplo, tráfego) e são valores negativos. Estes são somados ao R_w dependendo do ambiente de aplicação do objeto que está sendo estudado.

4.2 TÉRMICA – TRANSMITÂNCIA TÉRMICA OU COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

A transmitância térmica, ou coeficiente global de transferência de calor, (U) é dada em W/m².°C e de acordo com a EN ISO 9869-1:2014 [67] pode ser calculado pela expressão (4.2.1):

$$U = \frac{1}{R_{int} + \sum_1^j R_j + R_{ext}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}] \quad (4.2.1)$$

onde:

R_{int} e R_{ext} – Resistência térmica do material da face interior e exterior, respectivamente, do edifício [m².°C/W];

$\sum_1^j R_j$ – Resistência térmica da camada j que está entre a face interior e exterior do edifício [m².°C/W].

A resistência (R) dado em de cada camada é calculado pela razão de sua espessura (e) e do coeficiente de condutibilidade de seu material (λ), isto é:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}] \quad (4.2.2)$$

No entanto, tal dado normalmente é fornecido nos catálogos dos fabricantes. Embora o cálculo do coeficiente global de transferência de calor seja simples, só é possível utilizá-la em elementos homogêneos. Em paredes de LSF, onde há a ocorrência de pontes térmicas, isto é, onde um componente ou área com condutividade térmica maior do que suas proximidades, resulta num caminho de menor resistência para a transferência de calor [68]. Isto reduz a resistência térmica da parede e prejudica seu desempenho térmico. Este pode ser minimizado, por exemplo, pela introdução de materiais isolantes no contato destas áreas/objetos com as faces da parede ou minimizando o número destes elementos.

Estas pontes também tornam o elemento não homogêneo e por este motivo neste trabalho será utilizado o *software* THERM que utiliza análise de elementos finitos para a análise térmica em duas dimensões e obtenção do valor U geral da superfície.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 GEOMETRIAS

Todos os modelos utilizados (desenhos CAD, THERM e INSUL) estão disponíveis para *download* em formato DWG, .THM e .IXL em um repositório em [69].

5.1.1 THERM

Para avaliar o comportamento térmico das paredes em LSF com o software THERM é primeiro necessário identificar uma seção de parede representativa para modelar. Para uma parede com linha única de perfis de aço verticais e uma frequência de 600 mm a cada dois perfis, padrão EN ISO 10211:2007 [70] sugere aproveitar essa sequência repetitiva para localizar os planos adiabáticos.

Seguindo a recomendação da norma, 6 seções transversais de paredes em LSF medindo 600 mm, placas de gesso medindo 12,5 mm e com um perfil de aço de 100 mm no centro (perfil em C ou acústico (Figura 15)) foram definidas para as simulações térmicas no *software* THERM, são elas: uma placa de gesso com 3 espessuras diferentes de material isolante e duas placas de gesso com as mesmas 3 espessuras. As Figuras 16, 17 e 18 são 3 exemplos dos 12 modelos relativos aos perfis C e acústico.

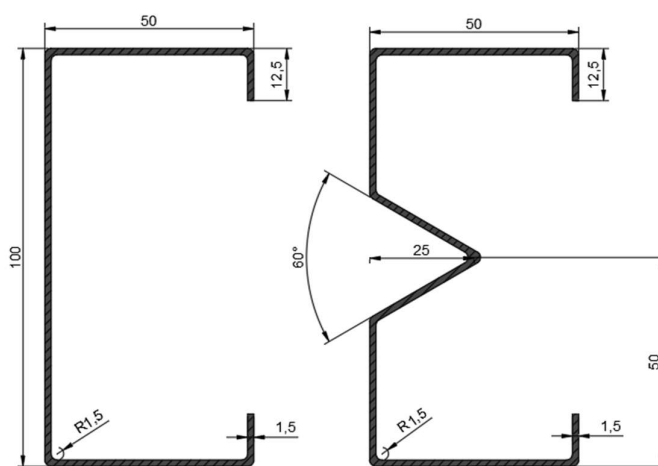


Figura 15: Perfil em C e perfil acústico [mm].

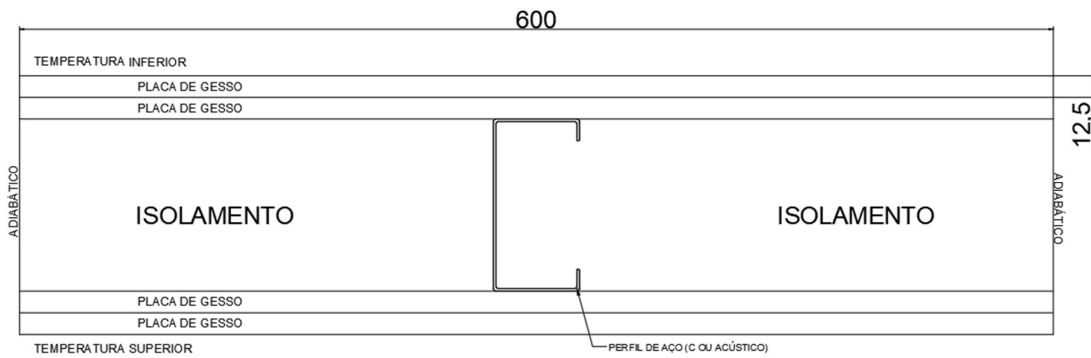


Figura 16: Modelo para perfil em C com duas placas de gesso e isolante de espessura total 100 mm.

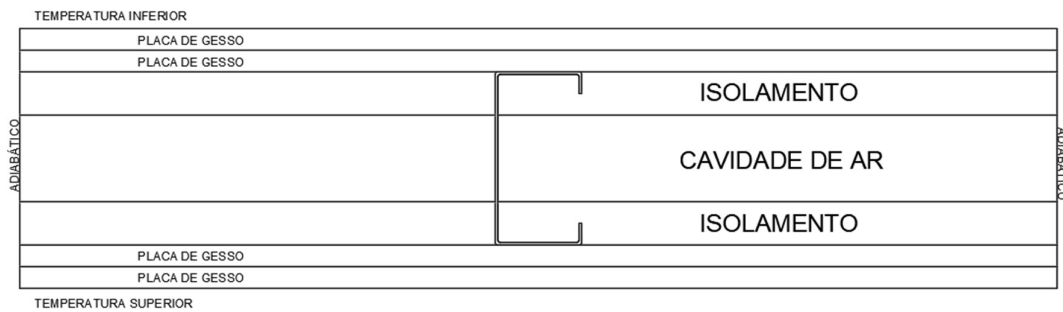


Figura 17: Modelo para perfil em C com duas placas de gesso e isolante de espessura total 50 mm.

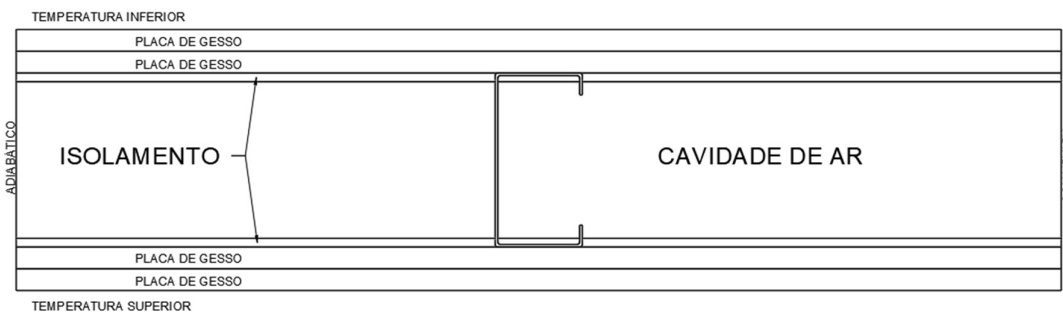


Figura 18: Modelo para perfil em C com duas placas de gesso e isolante de espessura total 10 mm.

Para o perfil em C com vigas escalonadas/individuais (Figura 19), a distância entre os centros dos perfis de aço é de 300 mm e a distância das paredes adiabáticas é de 150 mm, conforme utilizado comercialmente [71][72], conforme Figura 20. Para este perfil também teremos as mesmas 6 configurações: uma placa de gesso com 3 espessuras diferentes de material isolante e duas placas de gesso com as mesmas 3 espessuras de material isolante. As Figura 20, 21 e 22 são 3 exemplos dos 6 modelos relativos ao perfil em C com vigas escalonadas.

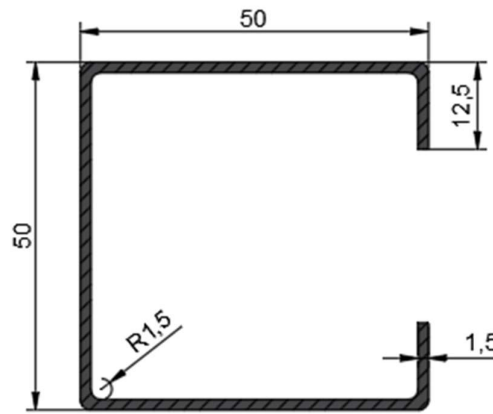


Figura 19: Perfil escalonado [mm].

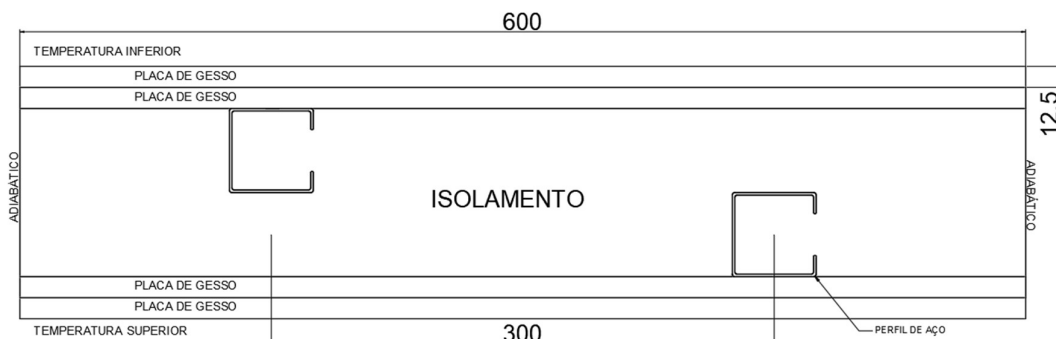


Figura 20: Modelo para perfil escalonado com duas placas de gesso e isolante de espessura total 100 mm.

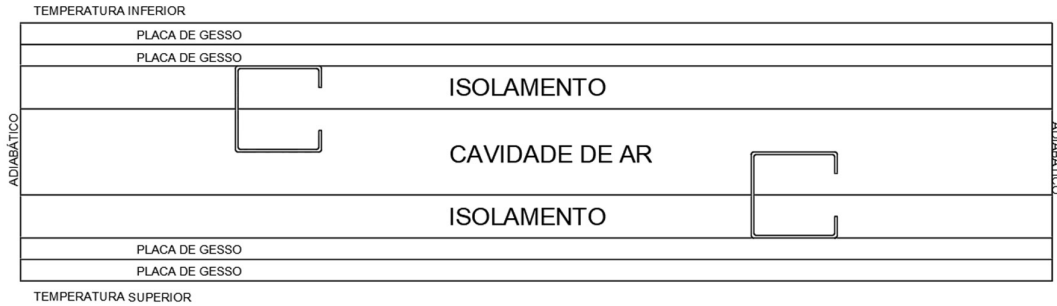


Figura 21: Modelo para perfil escalonado com duas placas de gesso e isolante de espessura total 50 mm.

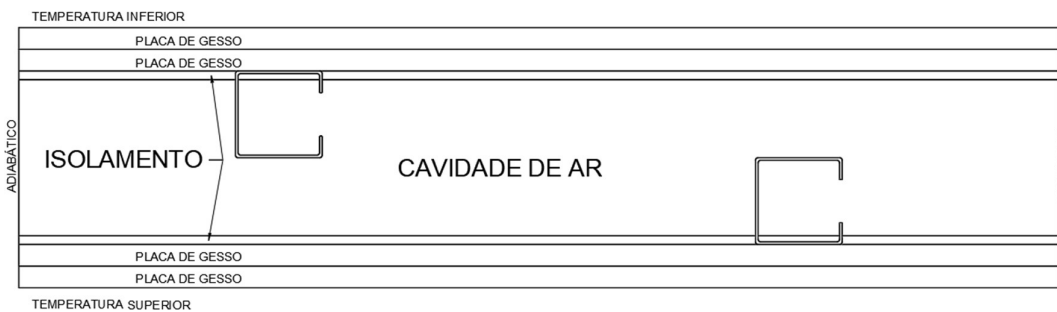


Figura 22: Modelo para perfil escalonado com duas placas de gesso e isolante de espessura total 10 mm.

Ao todos são 18 modelos. Seis para cada perfil, onde: 2 modelos de uma e duas placas de gesso como elemento de vedação, e cada um possui uma versão de 3 diferentes espessuras de material isolante. Estes 18 modelos serão testados com duas densidades de lã de rocha diferentes, totalizando 36 simulações térmicas.

5.1.2 INSUL

Para caracterização do isolamento acústico, usando o software INSUL [76], os seguintes dados são necessários: propriedades dos materiais utilizados (Módulo de elasticidade, densidade, resistividade ao fluxo de ar, etc), a espessura dos componentes da parede, a dimensão do cavidade de ar, o tipo de perfil de aço e sua espessura, largura e espaçamento. As geometrias e dimensões dos perfis de aço e painéis de gesso são as

mesmas citadas acima. As propriedades dos materiais são citadas no próximo tópico. Abaixo todos os modelos utilizados para as simulações no INSUL.

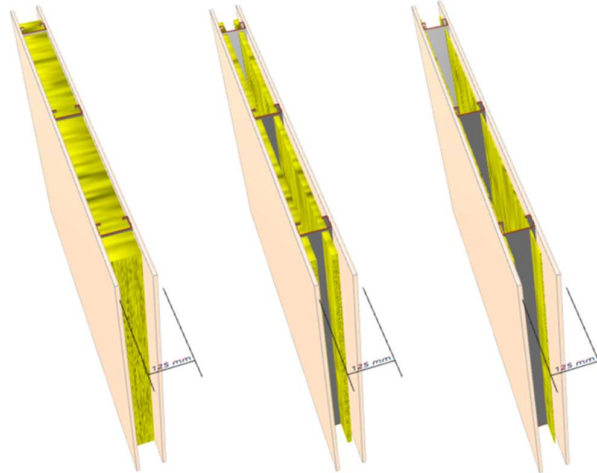


Figura 23: Perfil em C e uma placa de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.

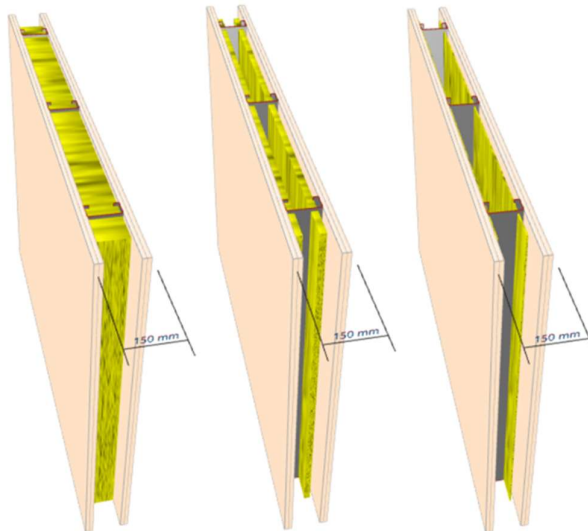


Figura 24: Perfil em C e duas placas de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.

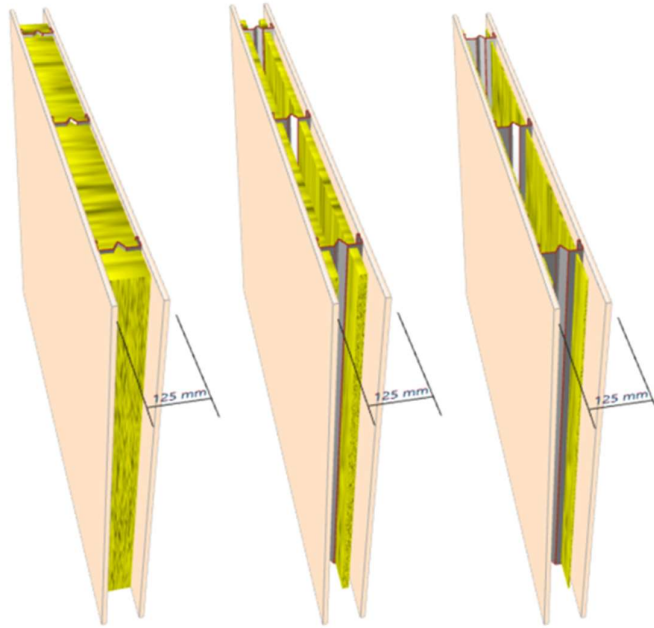


Figura 25: Perfil em acústico e uma placa de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.

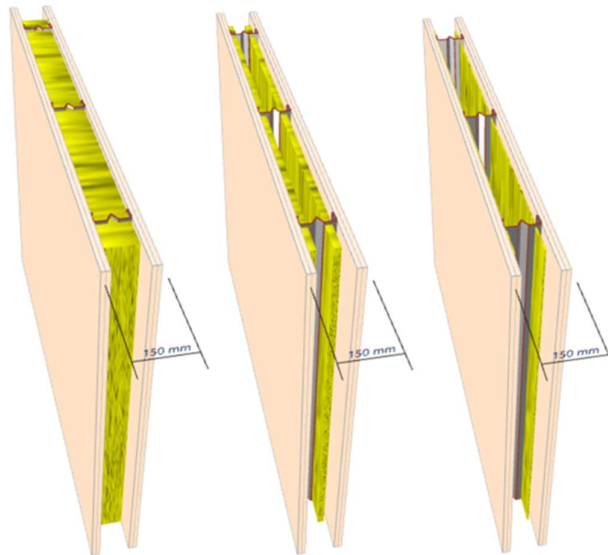


Figura 26: Perfil em acústico e duas placas de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.

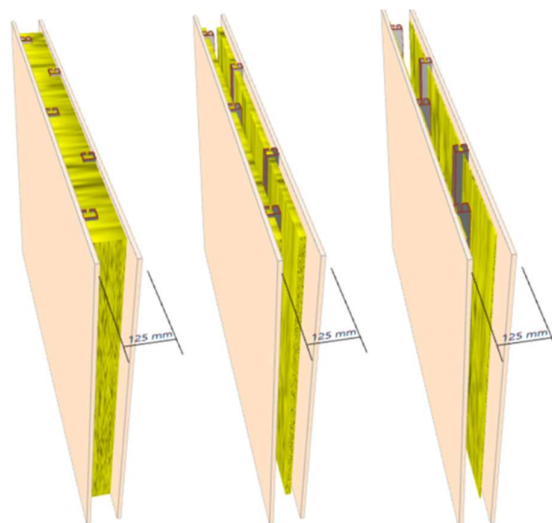


Figura 27: Perfil em C escalonado e uma placa de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.

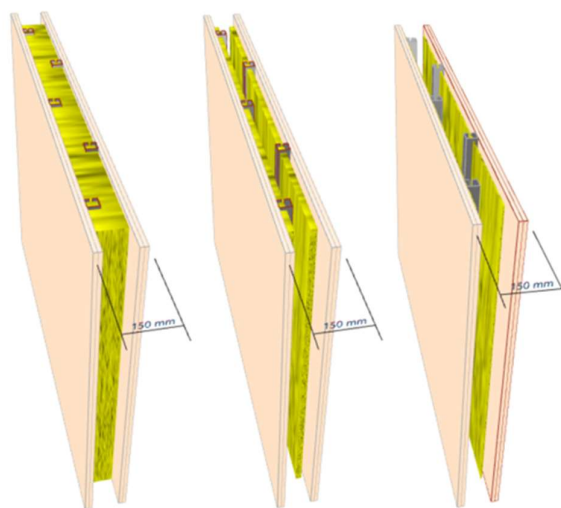


Figura 28: Perfil em C escalonado e duas placas de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.

O espaçamento é de 600 mm entre os perfis. A parede tem 2,4 m de comprimento e 2,7 m de altura.

Algumas literaturas, [55] e [43], sugerem o uso de barras resilientes, barra horizontais, para aumento do isolamento acústico, pois estas aumentam o “comprimento”

da ponte acústica, ou térmica, e acabam por dispersar uma quantidade de energia maior. Foram testados 6 modelos, figuras a seguir, nos mesmo moldes dos modelos anteriores, utilizando este conceito apenas como comparação aos outros modelos utilizados. Ele foi testado apenas no âmbito acústico, pois devido a sua construção, seria necessário um *software* de três dimensões para a análise térmica.

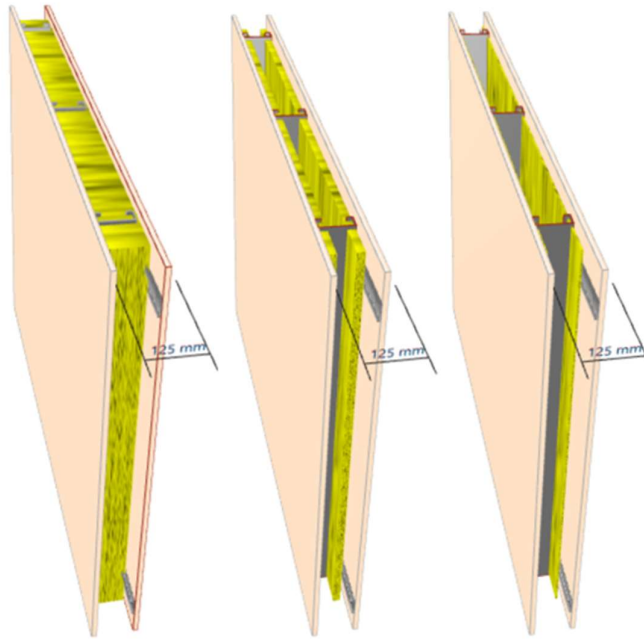


Figura 29: Perfil em C com barra resiliente horizontal e uma placa de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.

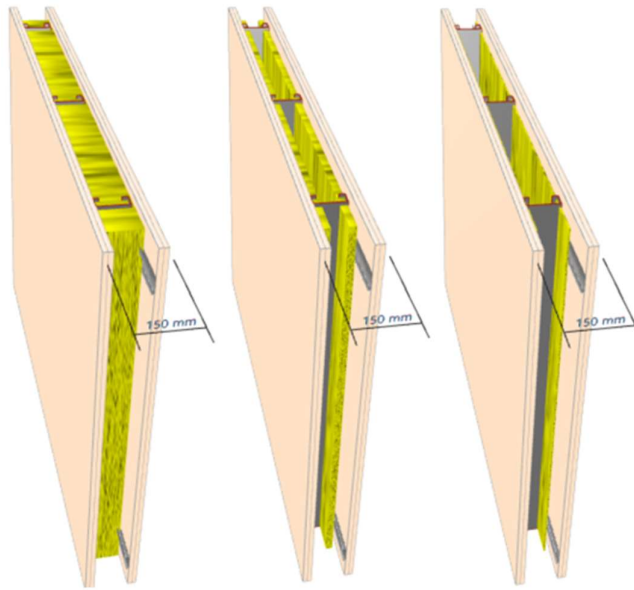


Figura 30: Perfil em C com barra resiliente horizontal e uma placa de gesso. Isolamento de 100, 50 e 10 mm respectivamente.

Ao todo serão 84 simulações: 36 simulações térmicas (2D) e 48 simulações acústicas (3D).

5.2 MATERIAIS

Neste estudo, para a parte térmica, estarão em análise três paredes de LSF, uma para cada tipo de perfil de aço, conforme exibido na Figura 15 e 19. Cada parede é composta por placas de gesso, perfil de aço e material isolante (lã de rocha), os quais possuem as seguintes propriedades:

Tabela 1: Condutividade térmica (λ), módulo de elasticidade (E), densidade (ρ), Poisson (ν) e amortecimento interno.

Propriedades físicas	Gesso cartonado	Aço S355	Lã de rocha 1	Lã de rocha 2
E [GPa]	2	210	-	-
λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,25	50	0,036	0,034
ν	0,27	0.3	-	-
ρ [kg.m ⁻³]	710	7810	30	70
Amortecimento Interno	0,009	-	-	-

Enquanto a caracterização do comportamento térmico requer apenas a condutividade térmica valor (λ), a caracterização do isolamento acústico envolve um conjunto maior de entradas, por exemplo, elasticidade módulo (E), razão de Poisson (ν), amortecimento interno, densidade (ρ) e a resistividade do fluxo de ar (σ) para materiais absorventes.

O material isolante será simulado nas espessuras de 10, 50 e 100 mm. As placas de gesso e perfis de aço possuem as medidas citadas no tópico anterior. Todos os materiais elásticos foram considerados isotrópicos, exceto as camadas de gesso cartonado que foram modeladas como materiais ortotrópicos devido à relação ortotrópica significativa. A análise a seguir estuda a presença de um material absorvente preenchendo a cavidade de ar. Lã de rocha com densidades de 30 kg.m⁻³ e 70 kg.m⁻³ são usadas. Com base no catálogo da empresa Termolan Isolamentos Termo-Acústicos S.A [73] e [74] uma resistividade ao fluxo de ar (σ) de 9500 Pa.s.m⁻² é assumido para a densidade de 30 kg.m⁻³ e 20700 Pa.s.m⁻² para a densidade de 70 kg.m⁻³.

5.3 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E PRECISÃO

A malha de elementos finitos de um modelo no software THERM [75] é controlada por dois parâmetros, o “*Quad Tree Mesh Parameter*”, relacionado ao tamanho

máximo da subdivisão da malha inicial, e a “*Maximum % Error Energy Norm*”, que define um limite para o estimador de erro durante os cálculos iterativos. Um método iterativo foi usado em todo o comportamento da análise térmica das paredes de LSF em que o padrão “*Quad Tree Mesh Parameter*” foi definido para o valor de 9 e o “*Maximum % Error Energy Norm*” fixada em menos de 2%.

Em relação à caracterização do isolamento acústico, o desenvolvedor do software INSUL indica que um erro dentro de $R_w \pm 3$ dB pode ser esperado [76].

5.4 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Para análise do comportamento térmico, as condições de contorno foram definidas no *software* THERM para as faces dos modelos. A face com menor temperatura foi definida a 10° C e a face com a maior temperatura a 20° C, conforme EN ISO 1:2016 [77]. O valor específico da temperatura não é um fator importante neste trabalho, visto que o que será analisado será o valor U que é dado pela diferença de temperaturas, seja elas quais forem. Também não será analisado um valor específico de U, apenas a sua variação entre os modelos simulados.

O coeficiente de transferência de calor superficial por convecção, que é dado pelo inverso da resistência térmica da superfície, foi definido de acordo com EN ISO 6946:2007 – Tabela 7, [78] (Figura 31), para um fluxo de calor horizontal, ou seja, $h_{menor} = 25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ e $h_{maior} = 7,69 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ para a face com temperatura menor e face com temperatura maior, respectivamente.

Surface resistance m ² ·K/W	Direction of heat flow		
	Upwards	Horizontal	Downwards
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

Figura 31: Resistência da superfície interna (R_{si}) a 20 °C e externa (R_{se}) a 10 °C [82].

Na análise de caracterização do isolamento acústico assumiu-se que a parede da fachada medindo 2,4 m de comprimento por 2,7 m de altura, sob exposição a um campo sonoro aleatório. O tamanho do painel pode influenciar a perda de transmissão de som medida. O *software* INSUL [76] prevê este efeito usando uma expressão desenvolvida por Sewell [79]. O software também contabiliza a perda de energia que ocorre na borda de uma estrutura circundante normal por meio do fator de amortecimento de borda. Este efeito é significativo para divisórias pesadas em construções normais. Como o estudo se concentrou em partições leves, o amortecimento de borda foi negligenciado.

5.5 CAMADAS DE AR

Para análise térmica, a camada de ar no interior da parede foi modelada assumindo a condutividade térmica equivalente de um sólido, de acordo com a metodologia estabelecida na EN ISO 6946:2007 [78]. Esta norma fornece os valores de resistência térmica equivalentes a serem usados ao modelar camadas de ar não ventiladas. Ela também prescreve uma resistência térmica (R_T) de $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ para camadas de ar de espessura entre 25 mm e 300 mm quando a direção de o fluxo de calor é horizontal. Portanto, a condutividade térmica equivalente a sólido (λ) de cada camada de ar foi calculada usando a resistência térmica equivalente conhecida (R_T) e a espessura da camada de ar (d).

5.6 PRECISÃO

5.6.1 THERM

O software THERM [75] é baseado em um algoritmo FEM 2D de última geração para modelar transferência de calor. Este software já foi usado por pesquisadores para avaliar a transferência de calor em vários tipos de elementos de construção, incluindo paredes de tijolos de barro perfurados [80], estruturas de LSF [58] [81] [82] e estruturas de madeira [83]. Além disso, a precisão do software THERM para calcular fluxos de calor e temperaturas de superfície foi verificado em [59], tendo em conta as orientações

fornecidas por duas normas, nomeadamente, EN ISO 10211:2007 [70] e EN ISO 6946:2007 [78]. Concluiu-se que o software THERM pode ser classificado como um método de alta precisão em estado estacionário 2D de acordo com EN ISO 10211:2007 [70]. Além disso, também foi verificado contra um software 3D FEM, ABAQUS/CAE em [17], revelando uma excelente concordância de resultados e destacando uma vez novamente a robustez da precisão do software THERM.

5.6.2 INSUL

A precisão da previsão do software INSUL foi comprovada por [84] que validou os resultados do *software* usando medições de laboratório. Diversos autores já utilizaram o software e já provaram sua confiabilidade como [85-87].

De acordo com E. Roque *et al.* [17] à medida que o desempenho do isolamento acústico aumenta, a precisão do INSUL tende a diminuir e que o *software* tende fornecer valores de R_w maiores do que as medidas experimentais. Ainda de acordo com E. Roque *et al.* [17], a maioria dos casos de verificação, as diferenças dos resultados experimentais são (± 3 dB). Conhecendo o erro mencionado pelo desenvolvedor do software em relação ao valor de R_w (± 3 dB), a maioria dos resultados obtidos estão de acordo com essa tolerância.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo a influência dos parâmetros: geometria do perfil, número de elementos de vedação, densidade e espessura do material isolante, serão analisados. Como citado anteriormente, 48 modelos acústicos e 36 modelos térmicos foram simulados.

Tabela 2: Parâmetros utilizados nas simulações.

Perfil	Simulação Acústica	Simulação Térmica	Placas de gesso	Densidade material isolante [kg/m ³]	Espessura total do material isolante [mm]
C	✓	✓			
Acústico	✓	✓	1	30	10
C escalonado	✓	✓			50
C com barra resiliente	✓	X	2	70	100

O isolamento térmico será avaliado a partir do valor U resultante da simulação no *software* THERM. O isolamento acústico a partir do valor R_w e termo de adaptação de espectro C_{tr} resultantes da avaliação no *software* INSUL. A análise será abordada de dois modos. Primeiramente uma visão geral de todos os resultados e em seguida uma análise do efeito de cada variável. Além disso, a importância do isolamento no que diz respeito a sua densidade e espessura também são abordados com relação ao desempenho térmico e acústico.

Os resultados finais dos valores de resistência térmica serão apresentados arredondados para duas casas decimais, de acordo com EN ISO 6946:2007 [78]. Para

facilitar a compreensão dos gráficos siglas foram dadas para os perfis e densidades conforme Tabela 3.

Tabela 3: Siglas perfis e densidades nos gráficos.

Perfil	Nome nos gráficos
C	C
C acústico	C AC
C escalonado	C ESC
C com barra resiliente	C RES
Densidade	Nome nos gráficos
30	D30
70	D70

Os resultados obtidos nas simulações estão na tabela a seguir:

Tabela 4: Resultado simulações.

Perfil	Densidade material Isolante [kg/m³]	Placas de gesso	Espessura total material isolante [mm]	R_w [dB]	C_{tr} [dB]	U [W/m².K]
C	30	1	10	41	-9	1,84
			50	41	-9	0,86
			100	42	-10	0,622
	70	2	10	50	-7	1,547
			50	50	-7	0,776
			100	50	-6	0,565
	70	1	10	41	-9	1,802

			50	42	-9	0,838
			100	43	-10	0,606
		2	10	50	-7	1,519
			50	50	-6	0,755
			100	51	-7	0,552
Acústico	30	1	10	43	-11	1,842
			50	44	-11	0,858
			100	45	-12	0,603
		2	10	55	-10	1,549
			50	56	-10	0,773
			100	58	-11	0,551
	70	1	10	43	-11	1,804
			50	45	-12	0,834
			100	47	-13	0,588
		2	10	55	-10	1,52
			50	57	-11	0,752
			100	59	-11	0,537
C escalonado	30	1	10	43	-10	1,891
			50	45	-12	0,81
			100	46	-12	0,403
		2	10	56	-10	1,585
			50	57	-10	0,801
			100	59	-11	0,387
	70	1	10	43	-10	1,849
			50	46	-12	0,784
			100	48	-13	0,384
		2	10	56	-10	1,554
			50	58	-10	0,779
			100	60	-11	0,369
C com	30	1	10	44	-10	-

Barra Resiliente	70	2	50	45	-11	-
			100	47	-12	-
			10	56	-9	-
		1	50	58	-10	-
			100	59	-10	-
			10	44	-10	-
	2	50	47	-12	-	
		100	49	-13	-	
		10	57	-10	-	
	1	50	59	-10	-	
		100	61	-11	-	
		10				

6.1 EFICIÊNCIA TÉRMICA

Todos os valores U resultantes das simulações estão ilustrados na Figura 32.

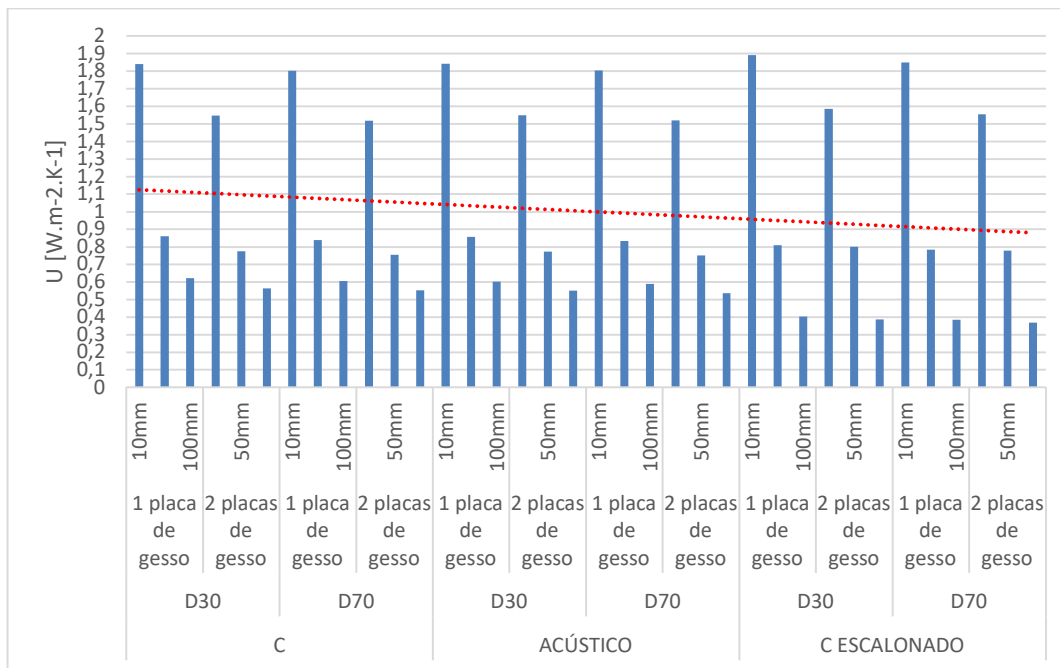


Figura 32: Resultados valor U.

De forma geral, é possível dividir o gráfico em 3 macrorregiões utilizando as três espessuras de material isolante:

- A primeira região com espessura total do isolamento de 10 mm, onde a transmitância térmica varia de 1,5 a aproximadamente 1,9 W/m²K;
- A segunda, onde a espessura total do isolamento é de 50 mm e a transmitância térmica varia de 0,75 a aproximadamente 0,9 W/m²K;
- E a terceira, onde a espessura total do isolamento é de 100 mm e a transmitância térmica varia de aproximadamente 0,35 a aproximadamente 0,6 W/m²K.

É nítido pela linha de tendencia, em vermelho da figura 32, que o aumento da espessura do material isolante reduz a transferência de calor na parede. Levando em consideração a média entre todos os perfis, densidades e placas de gesso, um aumento de cinco vezes em sua espessura, 10 mm para 50 mm, reduz mais de 50% a transferência de calor, de 1,69 para 0,80 W/m²K. Já um aumento de duas vezes, de 50 mm para 100 mm, reduz cerca de 36%, de 0,80 para 0,51 W/m²K. Por último, um aumento de dez vezes, 10 mm para 100 mm, reduz quase 70%, de 1,69 para 0,51 W/m²K. Nota-se uma relação inversamente proporcional entre espessura do material isolante-valor U, onde a espessura aumenta e o valor U diminui até 50% da espessura da cavidade, a partir disso a redução da transferência de calor reduz a uma taxa muito menor em relação ao aumento da espessura do material.

Aprofundando-se nessas três regiões, é possível verificar (Figura 33) que a utilização de uma ou duas placas de gesso como elemento de vedação apenas teve efeito significativo na primeira região, onde a espessura total do isolamento é de 10 mm e causou uma redução em média de aproximadamente 16%, 1,83 para 1,54 W/m²K. Isto pois o material isolante possui a maior resistência térmica da parede (Tabela 1) e cresce ao passo que sua espessura aumenta nas simulações, já a espessura das placas de gesso são constantes e possuem menor resistência térmica.

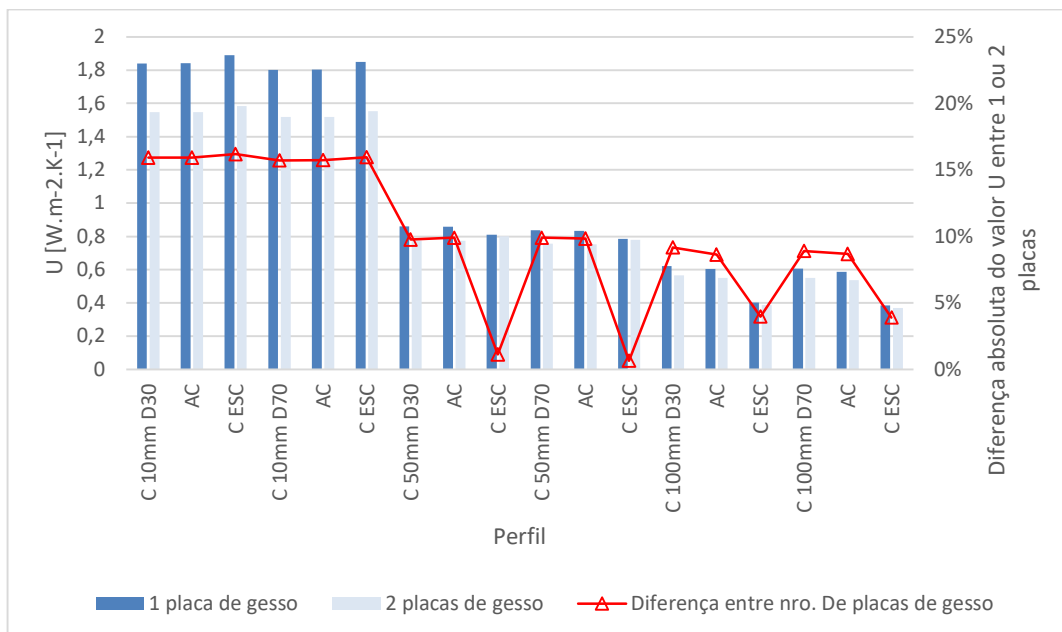


Figura 33: Diferença absoluta do valor U entre o número de placas de gesso.

Em relação aos perfis (Figura 34), pouca diferença pode ser notada entre o perfil C, acústico e C escalonado nas espessuras do material isolante de 10 mm e 50 mm. No entanto, o perfil C escalonado se sobressai nos casos onde a espessura de material isolante é de 100 mm. Nestes casos o perfil escalonado obteve redução de mais de 30% em relação aos outros dois perfis, isto provavelmente devido a sua construção não criar pontes térmicas aliado ao material isolante substituir o ar dentro da cavidade, aumentando a resistência térmica da parede.

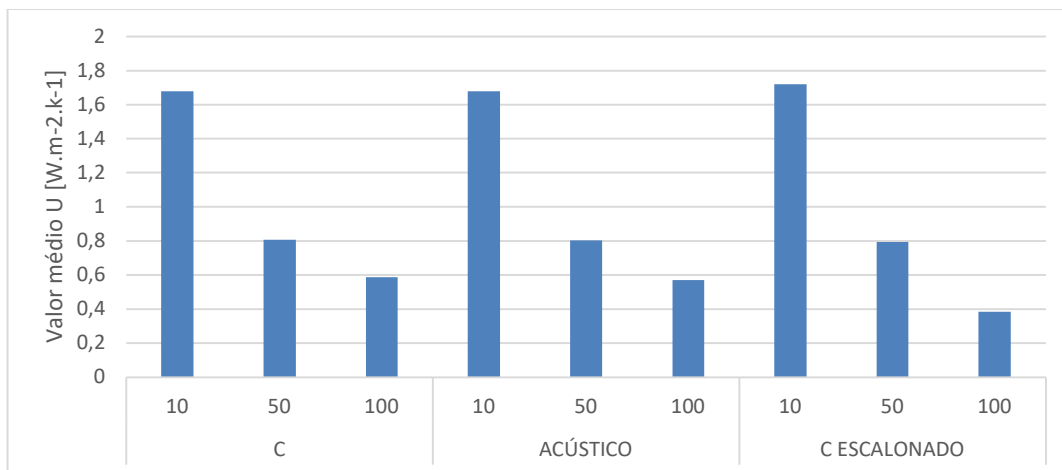


Figura 34: Valor médio de U para cada perfil.

As duas densidades de lã de rocha testadas não surtiram efeito significativo no coeficiente global de transferência de calor em nenhum dos casos (Figura 35).

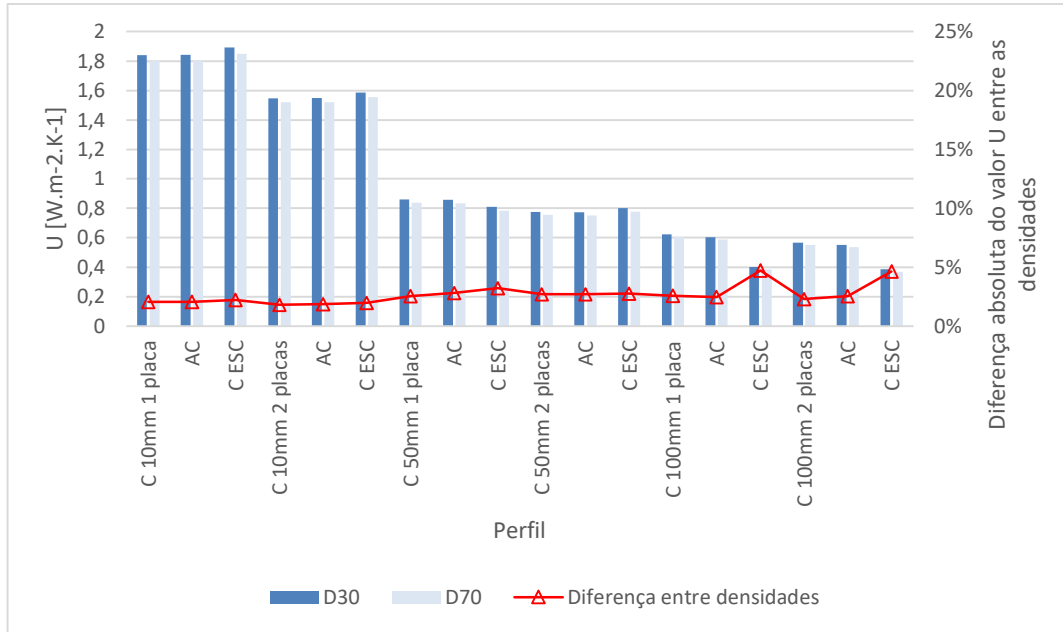


Figura 35: Diferença absoluta do valor U entre densidades.

As linhas isotermas foram semelhantes em todas as simulações, com diferenças de temperatura entre as faces na região próximo ao perfil de aço. Exemplo na Figura 36.

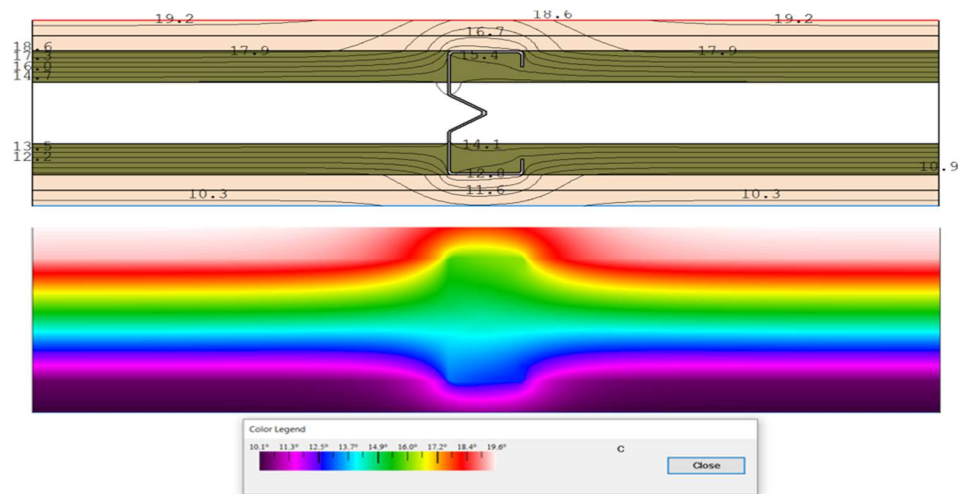


Figura 36: Linhas de mesma temperatura no modelo com perfil acústico, duas placas de gesso e isolamento total de 50 mm.

Em suma, é possível concluir que quando se trata de transferência de calor em paredes internas de LSF, onde não há o uso de ETICS, a espessura do material isolante é a principal variável, embora a espessura do material isolante também tem impacto significativo principalmente em parede com pouco material isolante.

6.2 EFICIÊNCIA ACÚSTICA - R_w

Nesta seção os mesmos modelos serão analisados com adição dos 6 modelos de perfil em C com barra resiliente. O índice de redução de som aparente ponderado, R_w será analisado. Este é resultado direto do INSUL (Figura 36).



Figura 37: Interface INSUL.

A partir dos mesmos modelos, temos os seguintes resultados de R_w :

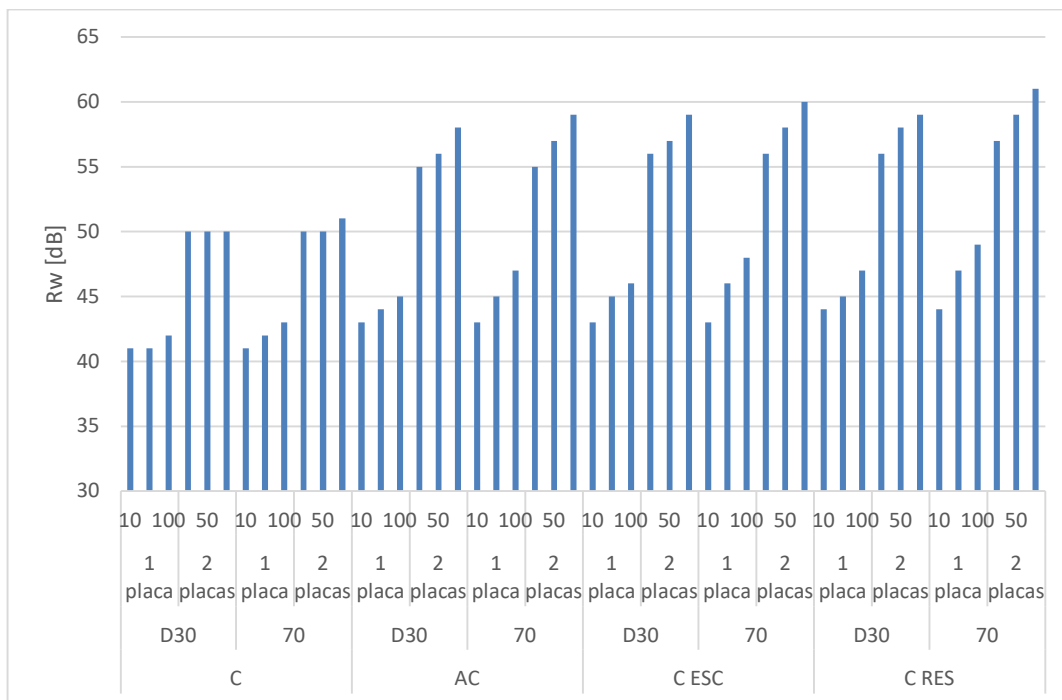


Figura 38: Resultados Rw.

O eixo das ordenadas foi ajustado para uma variação de 30 a 65 dB para facilitar a compreensão.

Nitidamente podemos dividir o gráfico em duas regiões, 1 placa de gesso e 2 placas de gesso, onde os modelos com 2 placas de gesso obtiveram de 16% a 23% (Figura 39) maior eficiência no isolamento acústico da parede.

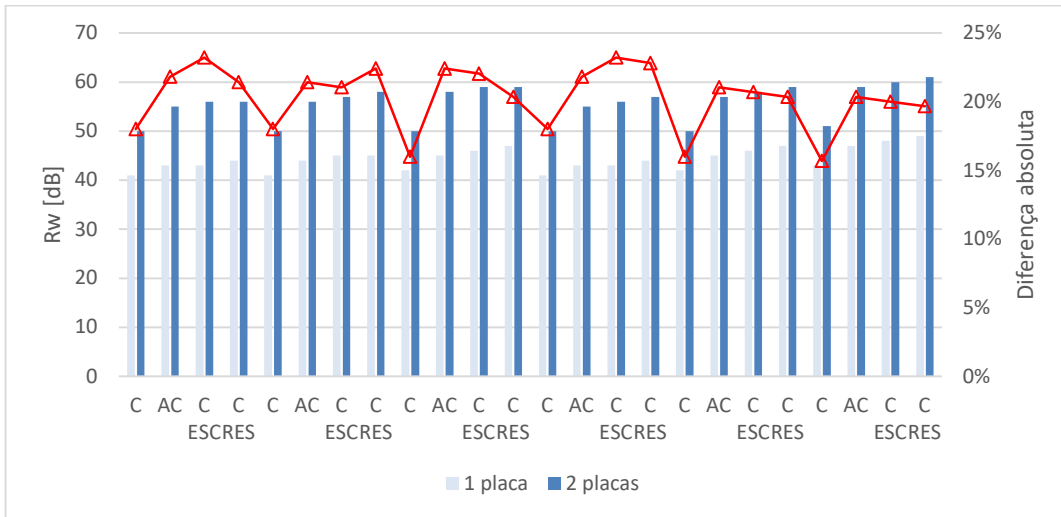


Figura 39: Erro absoluto entre o 1 e 2 de placas de gesso.

Analisando cada região separadamente, temos:

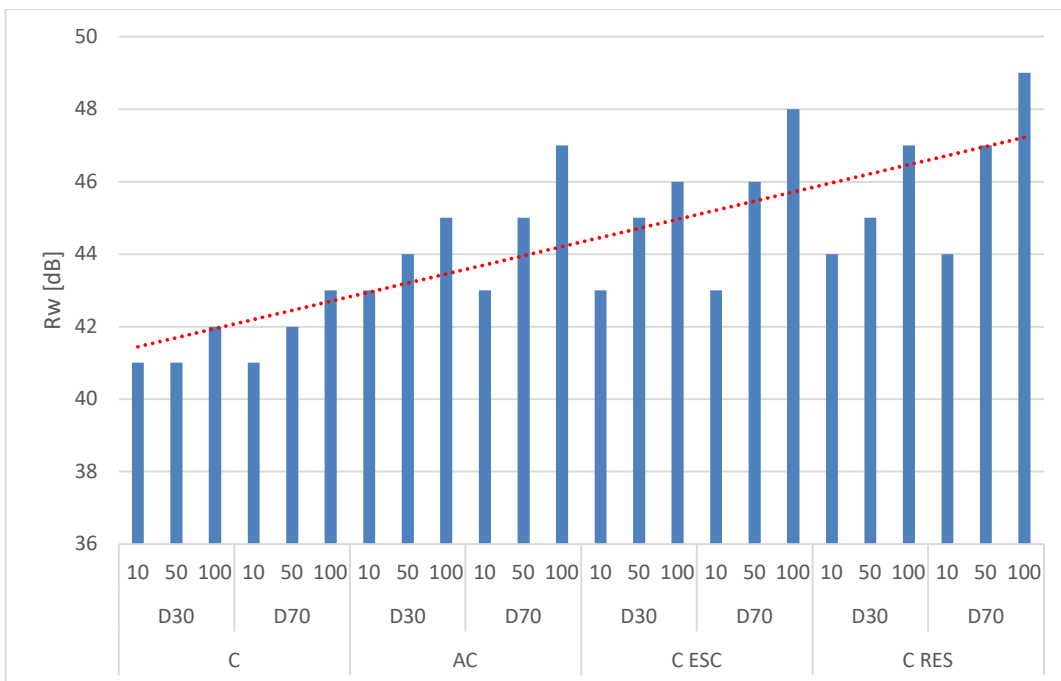


Figura 40: Rw para os modelos de 1 placa de gesso.

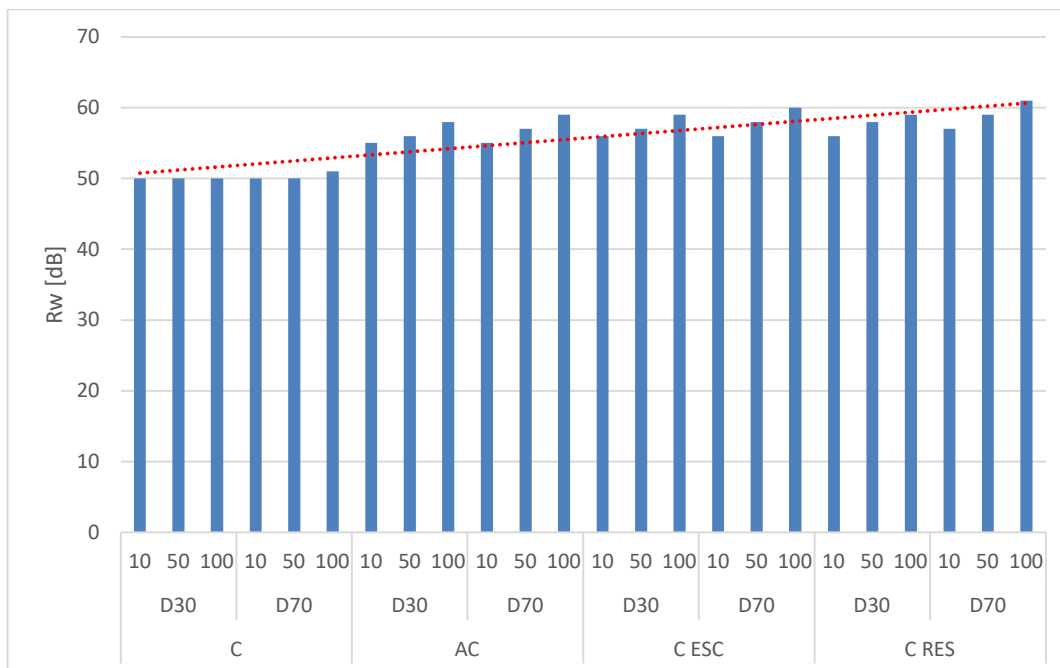


Figura 41: R_w para os modelos de 2 placas de gesso.

Em relação aos perfís, em ambos os gráficos se percebe pela linha de tendência em vermelho que R_w que a eficiência aumenta na seguinte sequência: C, C acústico, C escalonado, e o mais eficiente, C com barra resiliente. Conforme previsto na literatura, o perfil em C possui a menor eficiência dos três.

Em todos os modelos quanto maior a espessura do material isolante, maior foi sua eficiência acústica, variando de uma média de 43 dB em 10 mm para 45 dB em 100 mm em uma placa de gesso e de 54 dB em 10 mm para 57 dB em 100mm para duas placas de gesso (Figura 42). Esta pequena diferença na eficiência do isolamento acústico apesar do drástico aumento da espessura também foi notada por E. Roque *et al.* [17], pois o material isolante, lã de rocha, perde sua eficiência devido a presença do perfil de aço e é condizente com dados experimentais de Paul *et al.* [88].

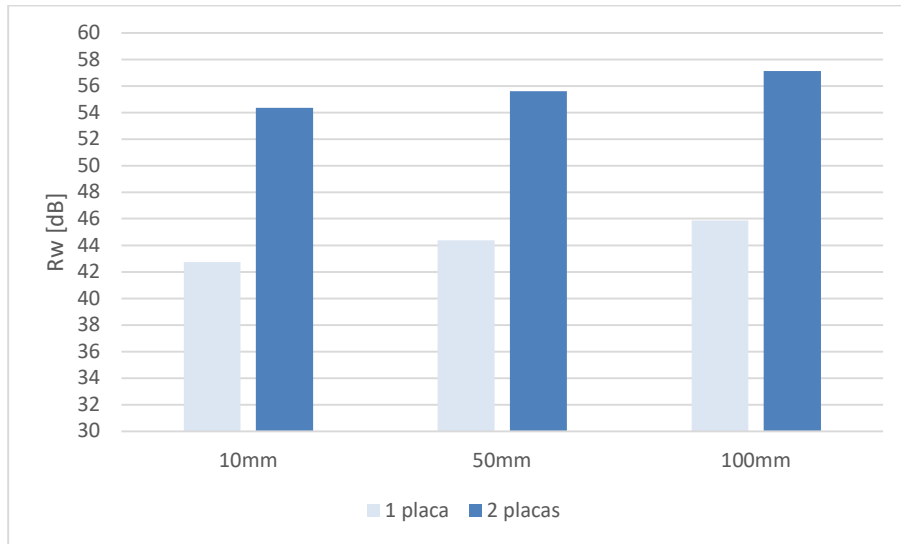


Figura 42: Média R_w entre modelos D30 e D70 em cada espessura de material isolante.

Em relação a densidade, novamente não houve diferença significativa na eficiência acústica. Uma diferença de no máximo 4% (Figura 43), 46 dB em densidade 30 e 48 dB em densidade 70. No entanto, todos os casos onde houve diferença, o material isolante com densidade de 70 possui a maior eficiência.

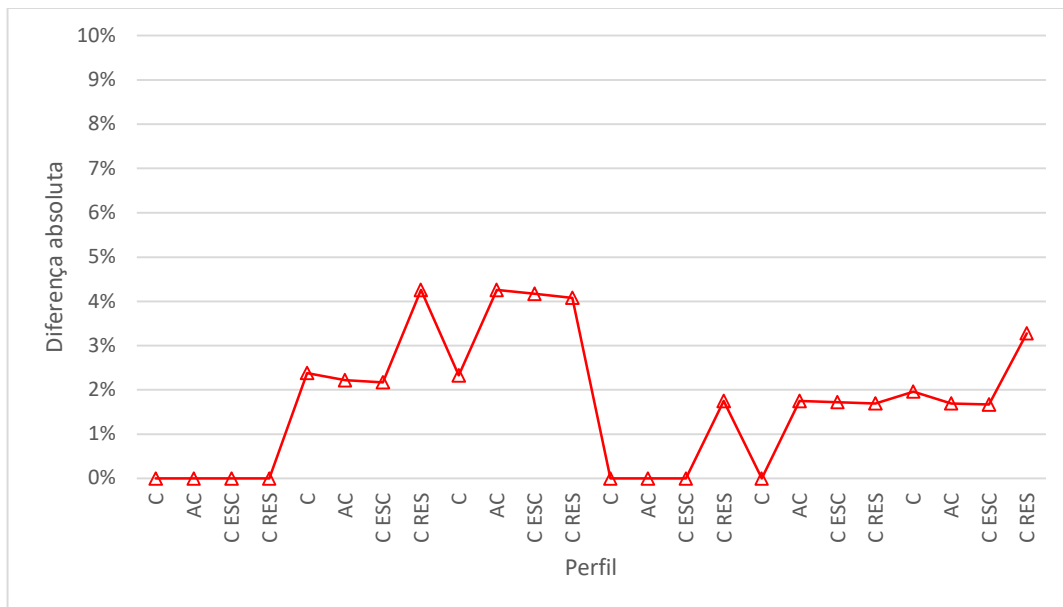


Figura 43: Diferença absoluta do R_w entre modelos D30 e D70.

6.3 EFICIÊNCIA ACÚSTICA - R_w+C_{tr}

De acordo com as orientações da EN ISO 717-1:2013 [26], quando paredes são expostas a ruídos de baixa frequência como o tráfego rodoviário urbano, a caracterização das propriedades de isolamento acústico dos elementos construtivos deve ter em conta o termo de adaptação C_{tr} , conforme citado na seção 4.1 deste trabalho.

O valor do termo é dado diretamente pelo INSUL, os dados obtidos estão dispostos na Tabela 4. Normalmente, à medida que uma solução construtiva é melhorada do ponto de vista do R_w , surgem valores negativos de C_{tr} com amplitudes mais baixas, o que significa que para ruídos de baixa frequência o desempenho sonoro da parede é penalizado [17]. De acordo com EN ISO 12354-1:2017 [25], para o desempenho acústico de paredes internas estruturais, os valores C_{tr} sugeridos estão entre -5 e -12 dB.

Abaixo, Figura 43, os valores de R_w+C_{tr} . Do mesmo modo que na seção anterior, modelos com 2 placas de gesso possuem maior eficiência, bem como maiores espessuras de material isolante.

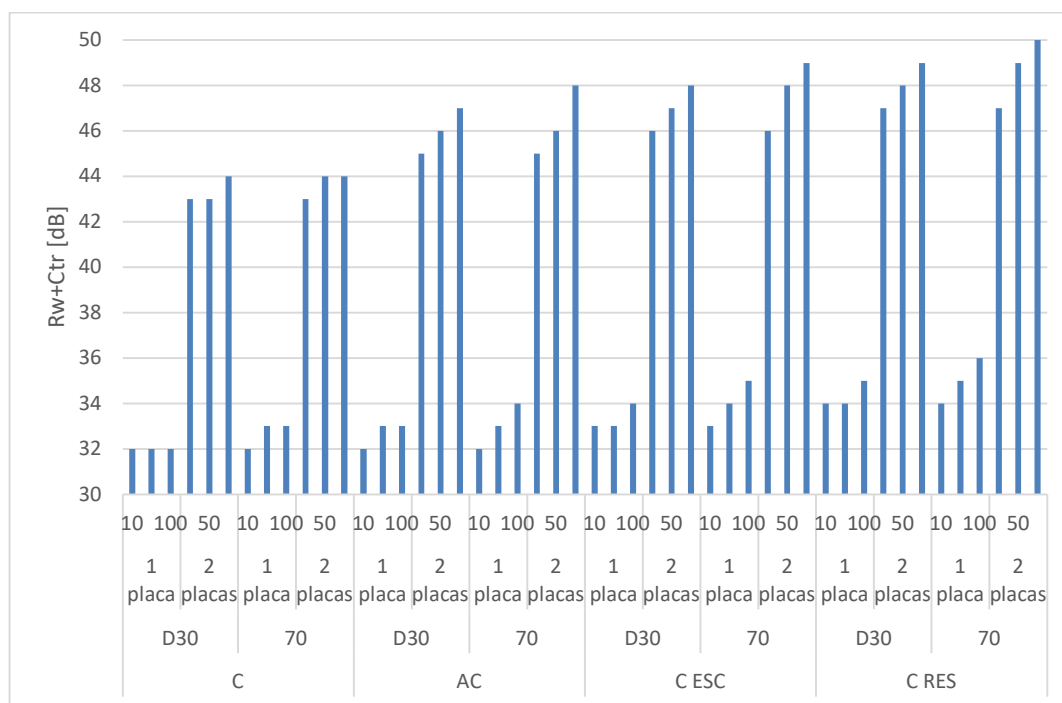


Figura 44: Valores R_w+C_{tr} .

Quando comparado a Figura 38 com a Figura 44 pode se verificar que a incidência de sons de baixa frequência afeta profundamente a eficiência acústica da parede com uma redução de 12% a 28% do R_w (Figura 45). O que é prejudicial em paredes interiores devido a sons de baixa-média frequência comuns nestes locais como como músicas, sons de televisões, água em tubulações, etc.

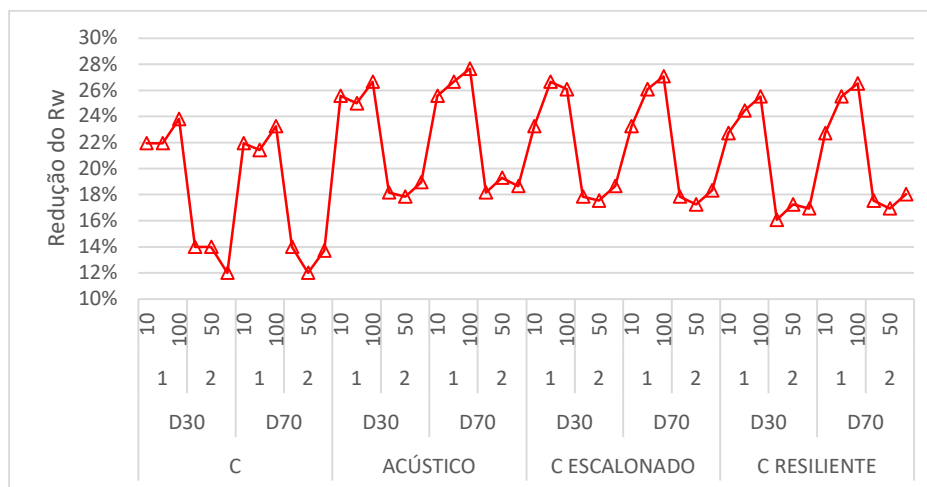


Figura 45: Redução do R_w ao somar o termo de adaptação C_{tr} .

Os modelos mais afetados foram os que possuíam 1 placa de gesso e 100 mm de material isolante. O termo de adaptação variou entre -6 dB a -13 dB, os quais são valores elevados. O maior valor de $R_w + C_{tr}$ obtido foi de 50 dB para o modelo com perfil em C e barra resiliente, 2 placas de gesso, material isolante de densidade 70 kg/m^3 e 100 mm de espessura total e o menor, 32 dB, para o modelo com perfil em C, 1 placa de gesso, material isolante de 30 kg/m^3 e 10 e 50 mm de espessura total.

A partir desta análise, pode-se ver que adicionar o termo de adaptação de espectro C_{tr} aos valores R_w obtidos podem introduzir mudanças significativas no desempenho de isolamento acústico das paredes de LSF. Pode se notar que em geral os modelos com 2 placas de gesso possuem menores valores de C_{tr} e que o perfil em C se destaca entre os perfis, possuindo os menores valores de C_{tr} .

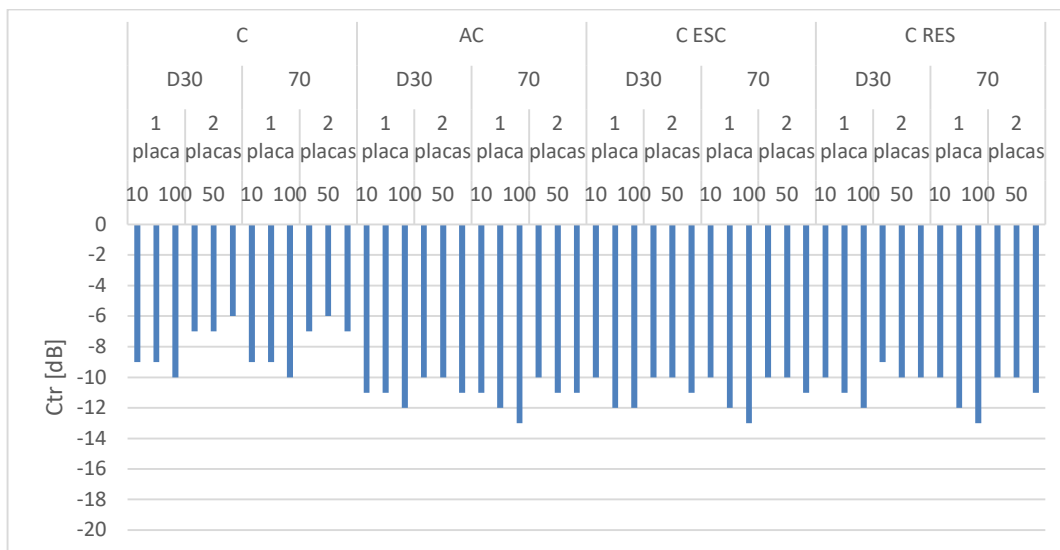


Figura 46: Valor Ctr.

EFICIÊNCIA ACÚSTICA E TÉRMICA

O objetivo deste trabalho é encontrar um modelo que possua um bom isolamento acústico e mantendo, ou aumentando, a eficiência térmica da parede.

Enquanto o número de placas de gesso é o principal fator para o isolamento acústico e possui os menores R_w+C_{tr} , este fator no quesito térmico causa uma diferença, mas não é tão expressivo quando a espessura do material isolante. Os modelos com 100 mm de material isolante possuem os menores valores U em todos os modelos e é o principal fator dentre os simulados para a redução da transferência de calor.

Da Figura 47 verifica-se que os perfis C e acústico pouco diferem, bem como as densidades D30 e D70. O perfil em C escalonado, principalmente nos modelos com 50 e 100 mm de material isolante, possui os maiores valores de R_w+C_{tr} (41 dB) e menores valor U (-16% em média), logo, atingindo o objetivo do trabalho, maximizar o isolamento acústico mantendo, ou melhorando, a eficiência térmica da parede. Este resultado deve-se provavelmente devido ao perfil C escalonado não possuir pontes térmicas/acústicas, isto é, não há um caminho de menor resistência entra as faces das paredes, o qual é

extremamente deficiente tanto para a eficiência acústica quanto para a térmica e é um efeito muito estudado no meio acadêmico.

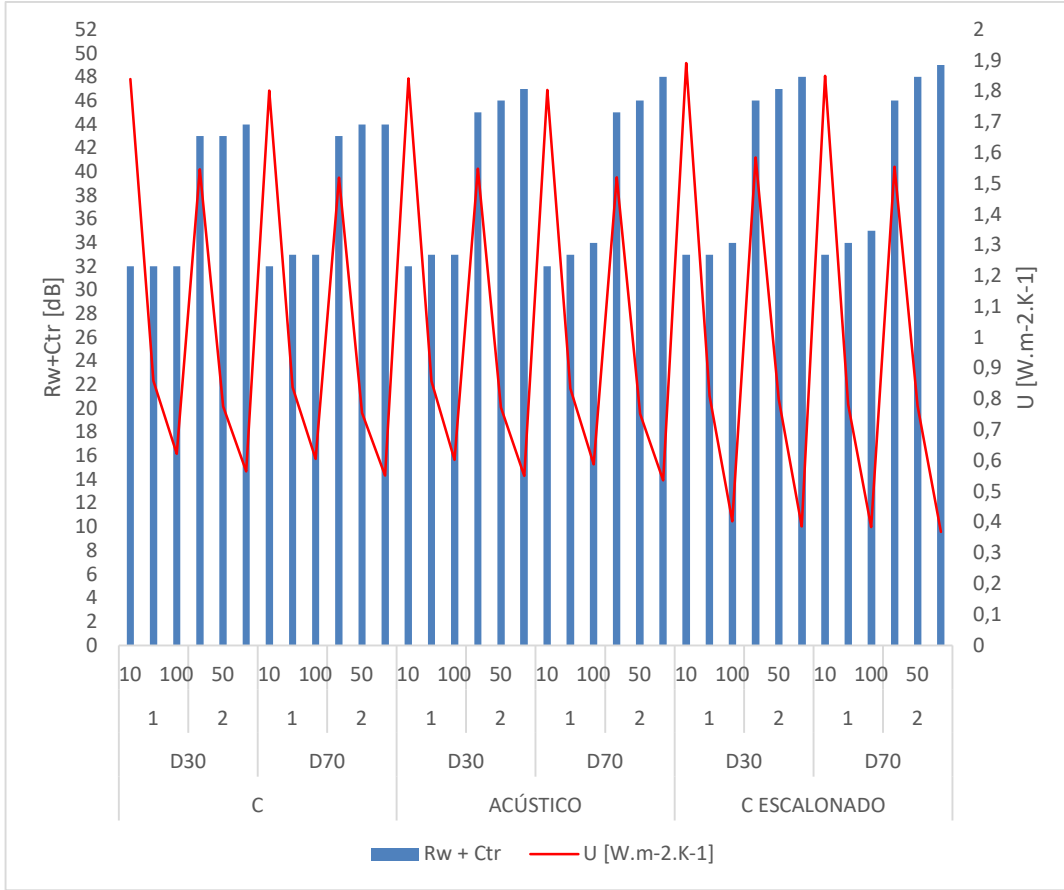


Figura 47: Rw+Ctr e Valor U.

7 CONCLUSÃO

7.1 CONCLUSÃO

Este trabalho descreve um estudo que foi realizado para avaliar a influência das variáveis: elemento de vedação, perfil de aço, espessura e densidade do material isolante na eficiência acústica e térmica das paredes internas de LSF. Os resultados foram obtidos realizando uma análise numérica usando um modelo 2D de elementos finitos para a avaliação do comportamento térmico e usando um modelo 3D para desempenho acústico. Essas análises foram combinadas para fornecer uma diretriz da forma com que se pode utilizar estas variáveis para obter uma solução eficiente em termos térmicos e acústicos.

É importante notar que as estruturas reais de LSF têm uma estrutura de aço 3D e as simulações THERM realizadas foram bidimensionais. Além disso, transmissão de som pelos flancos não foi abordada neste trabalho, e a possível existência de janelas em uma fachada foi negligenciada, uma vez que a obra considerou apenas o som direto transmissão através de uma área de parede LSF opaca.

Uma flutuação grande de R_w e no valor U da parede devido à influência da composição da parede LSF foi encontrada. Para a mesma estrutura, apenas dobrando a quantidade de placas do material de vedação, podemos obter uma redução de aproximadamente 17% do valor U ou de aproximadamente 20% do valor de R_w . Do modelo mais simples ao mais robusto, temos uma redução de quase 80% do valor U e aproximadamente 33% para o valor de R_w .

Foi verificado que a densidade do material isolante, bem como os perfis de aço acústico, C escalonado e C com barra resiliente, tem pouco efeito tanto na eficiência térmica quanto acústica. No perfil em C verificou-se a menor eficiência térmica e acústica quando comparado com os demais perfis, cerca de 10% a menos em R_w e aproximadamente 5% no valor U .

Do ponto de vista térmico, aumentar a espessura do material isolante resultou numa grande diferença do valor U da parede. No entanto, do ponto de vista acústico não houve um efeito tão elevado e pode não ser eficaz em termos de desempenho aumentar excessivamente a espessura deste material. Por outro lado, a utilização de duas placas de

gesso, reduziu significativamente o valor de R_w e o valor U , mas há de ser estudado as restrições e viabilidade comercial e de construção para verificar até que ponto é positivo o aumento da espessura desta camada.

Em suma, a espessura do material isolante e do elemento de vedação foram os fatores mais importantes dentre os simulados e podem ser levados em consideração para se buscar paredes de LSF de boa eficiência tanto acústica quanto térmica. Foi verificado que o elemento de vedação (gesso) afeta significativamente o desempenho de isolamento acústico e térmico das paredes de LSF. Essa influência é notória em todos os modelos e, devido ao seu baixo custo, uma camada extra de material de vedação pode ser mais viável que o aumento da espessura do material isolante ou utilização de perfis de aço mais complexos. Foi visto de os resultados obtidos que o isolamento acústico de paredes em LSF paredes aumenta adicionando algum material fono-absorvente na cavidade de ar, e continua aumentando, não proporcionalmente, quando a espessura do isolamento da manta aumenta. Conclui-se também que a estrutura de aço quando comparado o perfil em C escalonado com os demais perfiz, que proporcionam uma ligação rígida entre os painéis de uma parede LSF, praticamente não há efeito na eficiência acústica da parede (Figura 44), no entanto tem efeito no valor U (Figura 34) e que para uma boa eficiência acústica e térmica, o elemento de vedação e o material isolante podem ser melhor endereçados que os demais parâmetros utilizados.

7.2 Proposta de trabalhos futuros

LSF pode ser composto de vários materiais, de diversas formas e de diversas espessuras e comprimentos. Essas muitas variáveis e seus efeitos podem ser melhor compreendidas e confrontadas com suas aplicações e viabilidade na construção real. Como trabalhos futuros algumas possibilidades são sugeridas:

- Aplicação dos mesmos modelos em laboratório ou *in situ* afim de verificar sua precisão e confiabilidade;
- Análise de mercado destes modelos levando em consideração viabilidade e custo dos materiais;

- Verificar quais até que limites vale a pena elevar as espessuras dos materiais levando em consideração custo e eficácia;
- Criação de algoritmo para otimização paramétrica das dimensões e propriedades dos componentes utilizados;
- Criação de algoritmo para otimização de forma do perfil de aço visando minimizar o valor U e maximizar a rigidez e R_w .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASHRAE. ASHRAE Terminology. Disponível online: <<https://xp20.ashrae.org/terminology/>> (Acessado em 14 de março de 2022).
- [2] Huang, L., Zhu, Y., Ouyang, Q. and Cao, B., 2012. A study on the effects of thermal, luminous, and acoustic environments on indoor environmental comfort in offices. *Building and environment*, 49, pp.304-309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.022>
- [3] Arif, M., Katafygiotou, M., Mazroei, A., Kaushik, A. and Elsarrag, E., 2016. Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5[1], pp.1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.03.006>
- [4] World Health Organization, 2011. Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe. World Health Organization. Regional Office for Europe.
- [5] Decision No 1386/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 ‘Living well, within the limits of our planet’ Text with EEA relevance. 2013.
- [6] Stansfeld, S.A. and Matheson, M.P., 2003. Noise pollution: non-auditory effects on health. *British medical bulletin*, 68(1), pp.243-257. DOI: <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg033>
- [7] Auger, N., Duplaix, M., Bilodeau-Bertrand, M., Lo, E. and Smargiassi, A., 2018. Environmental noise pollution and risk of preeclampsia. *Environmental Pollution*, 239, pp.599-606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.060>
- [8] Foraster, M., Eze, I.C., Schaffner, E., Vienneau, D., Héritier, H., Endes, S., Rudzik, F., Thiesse, L., Pieren, R., Schindler, C. and Schmidt-Trucksäss, A., 2017. Exposure to road, railway, and aircraft noise and arterial stiffness in the SAPALDIA study: annual average noise levels and temporal noise characteristics. *Environmental health perspectives*, 125(9), p.097004. DOI: <https://doi.org/10.1289/EHP1136>
- [9] European Commission. [2020]. In focus: Energy efficiency in buildings. Disponível em: <https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiencybuildings-2020-feb-17_en> (Acessado em 16 de janeiro de 2022).

- [10] Directive 2010/31/EU of The European Parliament And Of The Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings [recast]. 2011. Disponível online: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF> (Acessado em 16 de janeiro de 2022).
- [11] Soares, N., Santos, P., Gervásio, H., Costa, J.J. and Da Silva, L.S., 2017. Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed [LSF] construction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, pp.194-209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.066>
- [12] EC European Commission, 2013. GREEN PAPER-a 2030 framework for climate and energy policies. COM [2013], 169.
- [13] Harvey, L.D., 2009. Reducing energy use in the buildings sector: measures, costs, and examples. *Energy Efficiency*, 2(2), pp.139-163. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-009-9041-2>
- [14] Sadineni, S.B., Madala, S. and Boehm, R.F., 2011. Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15[8], pp.3617-3631. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014>
- [15] Soares, N., Martins, C., Gonçalves, M., Santos, P., da Silva, L.S. and Costa, J.J., 2019. Laboratory and in-situ non-destructive methods to evaluate the thermal transmittance and behavior of walls, windows, and construction elements with innovative materials: A review. *Energy and Buildings*, 182, pp.88-110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.021>
- [16] Veljkovic, M. and Johansson, B., 2006. Light steel framing for residential buildings. *Thin-walled structures*, 44(12), pp.1272-1279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.01.006>
- [17] Roque, E., Santos, P. and Pereira, A.C., 2019. Thermal and sound insulation of lightweight steel-framed façade walls. *Science and Technology for the Built Environment*, 25(2), pp.156-176. DOI: <https://doi.org/10.1080/23744731.2018.1506677>
- [18] EN ISO 16309:2014. Sustainability of construction works - Assessment of social performance of buildings - Calculation Methodology. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.

- [19] Mateus, D., 2008. Acústica de Edifícios e controlo de ruído. Coimbra: Fctuc-Universidade de Coimbra.
- [20] Patrício, J., 2018. Acústica nos edifícios. Engebook.
- [21] Lang, J., 2014. Schallschutz in Europa. Bauphysik Kalender 2014: Schwerpunkt: Raumakustik und Schallschutz, pp.121-181. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783433603338.ch5>
- [22] Mateus, D., 2008. Acústica de Edifícios e controlo de ruído. Coimbra: Fctuc-Universidade de Coimbra.
- [23] Dolezal, F. and Spitzbart-Glasl, C., 2015. Relevance of acoustic performance in green building labels and social sustainability ratings. Energy Procedia, 78, pp.1629-1634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.241>
- [24] PORTUGAL. Leis, Decretos. “Regulamento Geral do Ruído” – Dec. Lei 9/2007 de 17 de Janeiro. Disponível online: < <https://dre.pt/dre/legislacao-consolidada/decreto-lei/2007-34526375>> (Acessado em 20 de janeiro de 2022).
- [25] EN ISO 12354-1:2017 - Building acoustics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — Part 1: Airborne sound insulation between rooms.
- [26] ISO 717-1:2013 - Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation, 2013.
- [27] Tiest, W.M.B., 2010. Tactual perception of material properties. Vision research, 50(24), pp.2775-2782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.10.005>
- [28] Bhatta, S.R., Tiippana, K., Vahtikari, K., Kiviluoma, P., Hughes, M. and Kytä, M., 2019. Quantifying the sensation of temperature: A new method for evaluating the thermal behaviour of building materials. Energy and Buildings, 195, pp.26-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.047>
- [29] Kusuda, T., 1977. Fundamentals of building heat transfer. Journal of research of the National Bureau of Standards, 82(2), p.97. DOI: <https://dx.doi.org/10.6028%2Fjres.082.008>

- [30] Asan, H., 2000. Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view. *energy and buildings*, 32(2), pp.197-203. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00044-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00044-X)
- [31] Asan, H., 1998. Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor. *energy and buildings*, 28(3), pp.299-305. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00030-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00030-9)
- [32] Ozel, M., 2014. Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness. *Energy and Buildings*, 72, pp.288-295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.015>
- [33] Yumrutaş, R., Kaşka, Ö. and Yıldırım, E., 2007. Estimation of total equivalent temperature difference values for multilayer walls and flat roofs by using periodic solution. *Building and Environment*, 42(5), pp.1878-1885. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.02.020>
- [34] Luo, C., Moghtaderi, B., Sugo, H. and Page, A., 2007, September. Time lags and decrement factors under air-conditioned and free-floating conditions for multi-layer materials. In *Proceedings of the Building Simulation 2007 Conference, Beijing, China* (pp. 3-6). Disponível online: <http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2007/p098_final.pdf> (Acessado em 3 de fevereiro de 2022)>.
- [35] Sun, C., Shu, S., Ding, G., Zhang, X. and Hu, X., 2013. Investigation of time lags and decrement factors for different building outside temperatures. *Energy and Buildings*, 61, pp.1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.003>
- [36] Baldinelli, G., Bianchi, F., Rotili, A., Costarelli, D., Seracini, M., Vinti, G., Asdrubali, F. and Evangelisti, L., 2018. A model for the improvement of thermal bridges quantitative assessment by infrared thermography. *Applied energy*, 211, pp.854-864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.091>
- [37] Ilomets, S., Kuusk, K., Paap, L., Arumägi, E. and Kalamees, T., 2017. Impact of linear thermal bridges on thermal transmittance of renovated apartment buildings. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(1), pp.96-104. DOI: <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.976259>

- [38] Real, S., Gomes, M.G., Rodrigues, A.M. and Bogas, J.A., 2016. Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings. *Construction and Building Materials*, 121, pp.460-470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.018>
- [39] ENV 1993-1-3 EUROCODE 3, Design of Steel Structures, Part 1 - 3: General Rules, Supplementary Rules for Cold-Formed Thin-Gauge Members and Sheeting”, CEN/TC 250/SC3 –European Committee for Standardisation, Brussels, 1996.
- [40] DIN EN 10346: Continuously hot-dip refined Steel flat products - Technical delivery conditions; German version prEN 10346:2007/as replacement of DIN EN 10292 (2007-06), DIN EN 10326 (2004-09), DIN EN 10327 (2004-09), DIN EN 10336 (2007-07).
- [41] Silvestre, N., Pires, J. and Santos, A., 2013. Manual de conceção de estruturas e edifícios em LSF–Light Steel Framing. CMM–Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.
- [42] Arcelor Mittal. Disponível online: <https://constructalia.arcelormittal.com/files/european%20lightweight%20steel-framed%20construction--627c1249e5c97aecee4a7eb06658b457.pdf> (Acessado em 12 de janeiro de 2022).
- [43] European Lightweight Steel-framed Construction. Luxemburg: LSK. Arcelor; 2005.
- [44] Geraldes, I.P.B., 2012. Sustentabilidade da construção de habitação social com recurso a liga metálica leve (Dissertação de doutorado, Faculdade de Ciências e Tecnologia).
- [45] Rego, D. J. (2012). Estruturas de Edifício em Light Steel Farming. Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e tecnologia e Universidade Nova de Lisboa.
- [46] EN 300:2019 Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specifications.

- [47] IARC, 1988. IARC Man-made Mineral Fibres and Radon, IARC Monographs on the evaluation of the carcinogenic risks to humans, Volume 43. ISBN: 978-92-832-1243-0
- [48] Sirok, B., Blagojevic, B. and Bullen, P., 2008. Mineral wool: production and properties. Elsevier. ISBN: 9781845694456 1845694457
- [49] Rockwool. Disponível online: <https://www.rockwool.com/siteassets/rwes/herramientas/biblioteca-de-documentos/tarifas/tarifa-rockwool_2020_pt.pdf?f=20200218102616> (Acessado em 10 de janeiro de 2022).
- [50] Futureng. Disponível online: <<http://www.futureng.pt/gesso-laminado>> (Acessado em 12 de janeiro de 2022).
- [51] Amaro, B., Saraiva, D., de Brito, J. and Flores-Colen, I., 2013. Inspection and diagnosis system of ETICS on walls. Construction and Building Materials, 47, pp.1257-1267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.024>
- [52] APFAC manual 2018. Disponível online: <<https://www.apfac.pt/uploads/documentos/APFAC-MANUAL-ETICS-2018.pdf>> (Acessado em 14 de janeiro de 2022).
- [53] Poblet-Puig, J., Rodríguez-Ferran, A., Guigou-Carter, C. and Villot, M., 2009. The role of studs in the sound transmission of double walls. Acta Acustica united with Acustica, 95(3), pp.555-567. DOI: <https://doi.org/10.3813/AAA.918176>
- [54] Knauf. Disponível online: <<http://www.knauf.com.cn/en/product/show.aspx?cid=73746443898191872&cid2=73748642921447424&id=90>> (Acessado em 14 de janeiro de 2022).
- [55] ED015, Acoustic Performance of Light Steel Construction Institute, Steel Construction Institute, 2012.
- [56] Gorgolewski, M., 2007. Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing. Building and Environment, 42(1), pp.230-236.
- [57] Martins, C., Santos, P., & Da Silva, L. S. (2016). Lightweight steel-framed thermal bridges mitigation strategies: A parametric study. Journal of Building Physics. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.001>

- [58] De Angelis, E. and Serra, E., 2014. Light steel-frame walls: thermal insulation performances and thermal bridges. *Energy Procedia*, 45, pp.362-371. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.039>
- [59] Roque, E. and Santos, P., 2017. The effectiveness of thermal insulation in lightweight steel-framed walls with respect to its position. *Buildings*, 7(1), p.13. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings7010013>
- [60] Santos, P. and da Silva, L.S., 2017. Energy efficiency of lightweight steel-framed buildings. *Energy Effic. Build*, 35, pp.180-191. DOI: 10.5772/66136
- [61] Fahy, F.J. and Gardonio, P., 2007. *Sound and structural vibration: radiation, transmission and response*. Elsevier. ISBN: 9780123736338
- [62] Szudrowicz, B. and Izewska, A., 1995. Simplified evaluation of flanking transmission based on the mean mass and mean area of flanking elements. *Applied Acoustics*, 46(3), pp.307-319. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(95\)00024-4](https://doi.org/10.1016/0003-682X(95)00024-4)
- [63] Rasmussen, B., 2010. Sound insulation between dwellings—Requirements in building regulations in Europe. *Applied Acoustics*, 71(4), pp.373-385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.08.011>
- [64] Rasmussen, B. and Machimbarrena, M., 2014. Existing sound insulation performance requirements and classification schemes for housing across Europe. In *COST Action TU0901—Building acoustics throughout Europe. Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe* (pp. 31-54). DiScript Preimpresion, SL. ISBN: 978-84-697-0158-4
- [65] Rasmussen, B., 2019. Sound insulation between dwellings—Comparison of national requirements in Europe and interaction with acoustic classification schemes. In *23rd International Congress on Acoustics* (pp. 5102-5109). Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA eV). ISBN: 978-3-939296-15-7
- [66] ISO 10140-2:2010, *Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 2: Measurement of airborne sound insulation*.
- [67] ISO 9869-1:2014. *Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method*.

- [68] Gorse, C., Johnston, D. and Pritchard, M., 2012. A dictionary of construction, surveying, and civil Engineering. Oxford University Press. DOI: 10.1093/acref/9780198832485.001.0001
- [69] Github. Disponível online: <https://github.com/renannlima/dissertacao-insul-therm.git/> (Acessado em 16 de março de 2022).
- [70] EN ISO 10211:2007. Thermal Bridges in Building Construction - Heat Flows and Surface Temperatures - Detailed Calculations. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (2007).
- [71] Steel Roofformed Products LTD. Disponível online: <https://www.srpltd.co.nz/acoustic-walls/staggered-steel> (Acessado em 14 de janeiro de 2022)..
- [72] Knauf. Disponível online: <https://siniat.com.au/wp-content/uploads/2019/02/Knauf-Blueprint-Chapter-3.1.1-Internal-Steel-Stud-Walls-English.pdf> (Acessado em 14 de janeiro de 2022).
- [73] Termolan Isolamentos Termo-Acústicos. Disponível online. <https://termolan.pt/produtos/fichas-tecnicas/> (acessado em 15 de janeiro de 2022).
- [74] Jochen Schulz. Disponível online: <https://www.jochenschulz.me/en/blog/rockwool-glasswool-hemp-best-absorber-material> (Acessado em 15 de janeiro de 2022).
- [75] THERM. Versão 7.8. Disponível online: <https://windows.lbl.gov/software/therm> (acessado em 05 de janeiro de 2022).
- [76] INSUL. INSUL Software Version 9.0.23. Disponível online: <https://www.insul.co.nz> (acessado em 05 de janeiro de 2022).
- [77] International Organization for Standardization (2016) ISO 1:2016 — Geometrical product specifications (GPS) – Standard reference temperature for the specification of geometrical and dimensional properties (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland).

- [78] ISO 6946:2017 Building components and building elements — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation methods. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (2017).
- [79] Sewell, E.C., 1970. Transmission of reverberant sound through a single-leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle. *Journal of Sound and Vibration*, 12(1), pp.21-32. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(70\)90046-5](https://doi.org/10.1016/0022-460X(70)90046-5)
- [80] Santos, P., Martins, C. and Julio, E., 2015. Enhancement of the thermal performance of perforated clay brick walls through the addition of industrial nanocrystalline aluminium sludge. *Construction and Building Materials*, 101, pp.227-238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.058>
- [81] Santos, P., Martins, C. and da Silva, L.S., 2014. Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems. *Metallurgical Research & Technology*, 111(6), pp.329-338. DOI: <https://doi.org/10.1051/metal/2014035>
- [82] Santos, P., Martins, C., da Silva, L.S. and Bragança, L., 2014. Thermal performance of lightweight steel framed wall: The importance of flanking thermal losses. *Journal of Building Physics*, 38(1), pp.81-98. DOI: <https://doi.org/10.1177%2F1744259113499212>
- [83] Mahattanatawe, P., Puvanant, C. and Mongkolsawat, D., 2006. The energy performance of the cold-formed steel-frame and wood-frame houses developed for Thailand. *Proceedings of SimBuild*, 2(1). Disponível online: < <https://ibpusa.org/index.php/ibpusa/article/download/208/195> > (Acessado em 16 de janeiro de 2022).
- [84] Prediction tools for airborne sound insulation- evaluation and application. c Jason Esan Cambridge, 2006. Master's Thesis 2006:65.
- [85] Ellefsen, J. and Olafsen, S., 2010. Empirical calculation of sound insulation in lightweight partition walls with separate steel studs. Disponível online: < https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ICA2010/papers/p203.pdf > (Acessado em 28 de janeiro de 2022).
- [86] Garg, N., Kumar, A. and Maji, S., 2013. Parametric sensitivity analysis of factors affecting sound insulation of double glazing using Taguchi method. *Applied Acoustics*, 74(12), pp.1406-1413. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.05.008>

- [87] Calleri, C., Astolfi, A., Shtrepi, L., Prato, A., Schiavi, A., Zampini, D. and Volpatti, G., 2019. Characterization of the sound insulation properties of a two-layers lightweight concrete innovative façade. *Applied Acoustics*, 145, pp.267-277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.10.003>
- [88] Paul, S., Radavelli, G.F. and da Silva, A.R., 2015. Experimental evaluation of sound insulation of light steel frame façades that use horizontal inter-stud stiffeners and different lining materials. *Building and Environment*, 94, pp.829-839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.010>