



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

Vanessa Frallonardo Figueiredo

SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS À BASE DE FIBRAS DE  
MADEIRA PARA APLICAÇÕES ACÚSTICAS

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma  
Construção Sustentável, Ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente Urbano,  
orientada pelo Professor Doutor Paulo Amado Mendes e pela Professora Doutora  
Helena Maria dos Santos Gervásio e apresentada ao Departamento de  
Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra

Março de 2024

Vanessa Frallonardo Figueiredo

# SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS À BASE DE FIBRA DE MADEIRA PARA APLICAÇÕES ACÚSTICAS

## SUSTAINABLE WOOD FIBER-BASED SOLUTIONS FOR ACOUSTIC APPLICATIONS

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, Ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente Urbano, orientada pelo Professor Doutor Paulo Amado Mendes e pela Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio.

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

Março de 2024



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, fundamentais na minha jornada acadêmica. Desde o início, eles ofereceram o suporte essencial, dedicando-se e investindo no meu desenvolvimento educacional. Sem o apoio incansável deles, nada do que alcancei seria possível. Meu irmão também merece reconhecimento especial pelo constante apoio. O fato de ele me enxergar como um exemplo é um incentivo adicional, motivando-me a transmitir a importância da educação e a persistência na busca pelos objetivos.

Aos meus orientadores, Professor Paulo Amado Mendes e a Professora Helena Gervásio, expresso meu agradecimento. Suas orientações e dedicação foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Diogo Mateus, agradeço pela disposição em auxiliar durante os ensaios e por oferecer suporte durante as análises de resultados. Agradeço também a todos os professores que ministraram suas aulas ao longo do meu percurso no mestrado. Suas contribuições foram cruciais para a minha formação acadêmica e enriqueceram significativamente a minha experiência de aprendizado.

Agradeço também às minhas amigas, cujo encorajamento e apoio foram essenciais ao longo de todo o período do mestrado. Suas palavras e presença, mesmo que à distância, foram inspiradoras, tornando essa trajetória mais significativa e gratificante.

Por fim, quero expressar meu reconhecimento a mim mesma. Manter-me firme nos momentos mais desafiadores, conciliando mestrado, trabalho e a adaptação em um país diferente, distante de toda a minha família e amigos, exigiu esforço, dedicação e determinação. No entanto, no desfecho desta jornada, posso afirmar que cada sacrifício valeu a pena.

*“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em  
procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos.”*

(Marcel Proust)

## RESUMO

Atualmente, a indústria da construção civil está entre as atividades mais destrutivas em termos de consumo de recursos naturais e energia, desempenhando um papel significativo na emissão de carbono e na geração de resíduos. Esse cenário acarreta uma série de impactos negativos para o meio ambiente, destacando a urgência na implementação de medidas destinadas a prevenir o esgotamento de recursos para as gerações futuras. Vale ressaltar que esse desafio não é novo, acompanhando o desenvolvimento da construção ao longo do tempo. Felizmente, o setor da indústria sustentável está em constante crescimento e a ganhar importância, através de soluções tecnológicas para lidar com esse problema. No âmbito da construção, outro desafio identificado, é a falta de desenvolvimento no campo da acústica das edificações. Diante desse cenário, o presente trabalho visa estudar soluções sustentáveis, com baixo carbono, e com propriedades acústicas promissoras. Para isso, serão estudados painéis sanduíches com material isolante constituído por fibras de madeira, para aplicação em fachadas e coberturas de edifícios, e realizadas avaliações do impacto ambiental, com base em análises do ciclo de vida. Além disso, serão feitos também ensaios acústicos para avaliar as suas características e seu desempenho acústico. Ao final, espera-se obter painéis com bom isolamento acústico e com baixa emissão de carbono, que possam ser utilizados como solução para diferentes finalidades. Dessa forma, será possível contribuir para a redução dos impactos ambientais na construção civil, além de melhorar o desempenho acústico nos ambientes a serem construídos ou reabilitados.

**Palavras-chave:** Materiais Sustentáveis, Fibras de Madeira, Baixo Carbono, Painéis Sanduíche, Impactos Ambientais, Análise de Ciclo de Vida, Desempenho Acústico.

## **ABSTRACT**

Currently, the construction industry is among the most destructive activities in terms of natural resources and energy, this also contributing to carbon emissions and waste generation. This scenario entails a series of negative impacts on the environment, highlighting the urgency of implementing measures aimed at preventing resource depletion for future generations. It is worth mentioning that this challenge is not new, following the development of building construction over time. Fortunately, the sustainable industry sector is constantly growing and gaining importance through technological solutions to deal with this problem. In the field of construction, another challenge identified is the lack of development in the field of building acoustics. In view of this scenario, the present work aims to study sustainable, low-carbon solutions with promising acoustic insulation properties. For this, sandwich panels with insulating material consisting of wood fibers will be studied, for application in building facades and roofs of buildings, and environmental impact assessments will be carried out, based on life cycle analyses. In addition, acoustics tests will also be done to evaluate its characteristics and acoustics performance. In the end, it is expected to obtain panels with good acoustic insulation and low carbon emissions, which can be used as a solution for different purposes. In this way, it will be possible to contribute to the reduction of environmental impacts in construction of buildings, in addition to improving the acoustic performance in the environments to be built or rehabilitated.

**Key-words:** Sustainable Materials, Wood Fibers, Low Carbon, Sandwich Panels, Environmental Impacts, Life Cycle Analysis, Acoustic Performance.

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1.	Enquadramento geral.....	12
1.2.	Objetivo .....	13
1.3.	Estrutura da tese.....	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	14
2.1.	DESEMPENHO AMBIENTAL.....	14
2.1.1.	Sustentabilidade na Construção Civil.....	14
2.1.2.	Análise do Ciclo de Vida.....	15
2.1.3.	Declarações Ambientais de Produto (DAP) .....	19
2.2.	DESEMPENHO ACÚSTICO .....	22
2.2.1.	Som e Ruído .....	22
2.2.2.	Desempenho Acústico e Parâmetros para Requisitos Acústicos.....	24
2.2.2.1.	Tempo de Reverberação ( $T_r$ ).....	25
2.2.2.2.	Isolamento a Sons Aéreos .....	26
2.2.3.	Medições.....	28
2.2.4.	Enquadramento legal .....	28
2.2.4.1.	Regulamento Geral do Ruído- RGR.....	28
2.2.4.2.	Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios- RRAE.....	29
2.3.	MATERIAIS SUSTENTÁVEIS PARA APLICAÇÕES ACÚSTICAS.....	29
2.3.1.	Madeira.....	29
2.3.2.	Cortiça .....	31
2.3.3.	Fibras Naturais.....	32
2.3.4.	Betão Sustentável .....	33
2.4.	PAINÉIS MODULARES .....	34
3.	METODOLOGIA.....	37
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES.....	37
3.1.1.	Painel Sanduíche de Revestimento – P1.....	37
3.1.2.	Painel Sanduíche para Coberturas Inclinadas- P2 .....	38
3.1.3.	Sistema de Revestimento Duplo- P3 .....	39
3.1.4.	Painel Sanduíche para Coberturas Planas- P4 .....	40
3.2.	ANÁLISE DE CICLO DE VIDA .....	41
3.2.1.	Definição do Escopo.....	41
3.2.2.	Análise de Inventário.....	41
3.2.3.	Avaliação de Impacto Ambiental .....	43
3.2.4.	Interpretação .....	44
3.3.	DESEMPENHO ACÚSTICO .....	45
3.3.1.	Metodologia Experimental .....	45
3.3.1.1.	Procedimento de Ensaio .....	45

3.3.1.2.	Tratamento dos Dados .....	50
3.3.2.	Metodologia de Previsão .....	53
3.3.2.1.	Elementos Simples .....	53
3.3.2.2.	Elementos Duplos.....	54
4.	RESULTADOS E ANÁLISES .....	57
4.1.	DESEMPENHO AMBIENTAL.....	57
4.2.	DESEMPENHO ACÚSTICO .....	61
4.2.1.	Resultados dos Ensaios Laboratoriais .....	61
4.2.1.1.	Painel Sanduíche de Revestimento- P1 .....	61
4.2.1.2.	Painel Sanduíche para Coberturas Inclinadas- P2 .....	62
4.2.1.3.	Sistema de Revestimento Duplo- P3 .....	64
4.2.1.4.	Painel Sanduíche para Coberturas Planas- P4.....	65
4.2.2.	Resultados das Previsões pelo Método de Sharp .....	67
4.2.2.1.	Elementos Simples .....	67
4.2.2.2.	Elementos Duplos.....	68
4.2.3.	Comparação dos painéis em estudo com a metodologia de previsão e com soluções já existentes no mercado.....	70
4.2.3.1.	Painel Sanduíche de Revestimento - P1 .....	70
4.2.3.2.	Painel Sanduíche para Coberturas Inclinadas- P2 .....	72
4.2.3.3.	Sistema de Revestimento Duplo- P3 .....	73
4.2.3.4.	Painel Sanduíche para Coberturas Planas- P4.....	75
5.	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	80



## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1-Resumo Construção Sustentável (Mateus, 2009)	14
Figura 2- Influência das decisões tomadas nas várias fases do ciclo de vida de um edifício (Mateus, 2009 apud Kohler & Moffatt, 2003).	15
Figura 3- Esquema ACV (Oliveira, 2021 adaptado de UNEP)	16
Figura 4- Estrutura da ACV (adaptado de ISO 14040, 2006)	18
Figura 5- Estrutura do sistema DAPHabitat (DAPHabitat, 2023)	21
Figura 6- Tipos de ruído e resposta do ouvido humano (Tadeu et al, 2010)	23
Figura 7- Curvas de ponderação da resposta do ouvido humano (Tadeu et al, 2010)	23
Figura 8- Tempo de reverberação (Tadeu et al, 2010)	25
Figura 9- Tempo de reverberação ótimo (Andrade, 2021)	26
Figura 10- Caminhos de transmissão do ruído aéreo (Mateus, 2022)	27
Figura 11- Estrutura da cortiça (Gonçalves, 2014)	31
Figura 12- Variação de absorção sonora em função da frequência (Demarchi, 2010)	33
Figura 13- Constituição de um painel sanduíche (Almeida, 2009)	35
Figura 14- Materiais de núcleo em painéis sanduíche (Almeida, 2009)	35
Figura 15- Dimensões do painel sanduíche de revestimento	38
Figura 16- Dimensões do painel sanduíche para cobertura inclinada	38
Figura 17- Dimensões do sistema de revestimento duplo	39
Figura 18- Montagem do sistema de revestimento duplo	39
Figura 19- Dimensões do painel sanduíche para cobertura plana	40
Figura 20- Vista em planta das câmaras reverberantes do DEC-UC	46
Figura 21- Vista em corte AA' das câmaras reverberantes do DEC-UC	46
Figura 22- Vista em corte BB' das câmaras reverberantes do DEC-UC com a zona de montagem de provetes assinalado	46

Figura 23- Câmaras acústicas durante preparo para montagem do ensaio (vista a partir da câmara emissora)	47
Figuras 24 e 25- Painel sanduíche de revestimento (P1) - Vista de ambas as faces	49
Figuras 26 e 27- Painel sanduíche de revestimento (P1) com aplicação das bandas de reforço - Vista de ambas as faces	49
Figuras 28 e 29- Painel sanduíche para coberturas inclinadas (P2) - Vista de ambas as faces	49
Figuras 30 e 31- Painel sanduíche para coberturas inclinadas (P2) com aplicação das bandas de reforço - Vista de ambas as faces	49
Figuras 32 e 33- Sistema de revestimento duplo (P3) - Vista de ambas as faces	50
Figura 34- Painel sanduíche para coberturas planas (P4)	50
Figuras 35 e 36- Painel sanduíche para coberturas planas (P4) com aplicação das bandas de reforço - Vista de ambas as faces	50
Figura 37- Curva normalizada de referência (adaptado de NP EN ISO 717-1)	52
Figura 38- Ilustração da curva de isolamento sonoro para elemento simples, através do modelo de Sharp (Tadeu et al, 2010)	54
Figura 39- Ilustração da curva de isolamento sonoro para elemento duplo, através do modelo de Sharp (Tadeu et al, 2010)	56
Figura 40- Resultados da ACV do painel P1	58
Figura 41- Resultados da ACV do painel P2	58
Figura 42- Resultados da ACV do painel P3	59
Figura 43- Resultados da ACV do painel P4	59
Figura 44- Resultados para os quatro painéis durante a etapa de produto	60
Figura 45- Resultados da redução sonora do painel sanduíche de revestimento P1, sem bandas de reforço acústico	61
Figura 46- Resultados da redução sonora do painel sanduíche de revestimento P1, com bandas de reforço acústico	62
Figura 47- Resultados da redução sonora do painel sanduíche para coberturas inclinadas P2, sem bandas de reforço acústico	63
Figura 48- Resultados da redução sonora do painel sanduíche para coberturas inclinadas P2, com bandas de reforço acústico	63

Figura 49- Resultados da redução sonora do sistema de revestimento duplo P3 com nervura de 25 mm	64
Figura 50- Resultados da redução sonora do sistema de revestimento duplo P3 com nervura de 40 mm	65
Figura 51- Resultados da redução sonora do painel sanduíche para coberturas planas P4, sem bandas de reforço acústico	66
Figura 52- Resultados da redução sonora do painel sanduíche para coberturas planas P4, com bandas de reforço acústico	66
Figura 53- Resultados da previsão para elementos simples- 150 mm	67
Figura 54- Resultados da previsão para elementos simples- 200 mm	68
Figura 55- Resultados da previsão para elementos duplos	69
Figura 56- Comparação da redução sonora entre o painel P1, solução comercial e previsão pelo modelo de Sharp	71
Figura 57- Comparação entre emissão de carbono de P1 e solução comercial	71
Figura 58- Comparação da redução sonora entre o painel P2, solução comercial e previsão pelo modelo de Sharp	72
Figura 59- Comparação entre emissão de carbono de P2 e solução comercial	73
Figura 60- Comparação da redução sonora entre o painel P3, solução comercial e previsão pelo modelo de Sharp	74
Figura 61- Comparação da redução sonora entre o painel P4, solução comercial e previsão pelo modelo de Sharp	75
Figura 62- Comparação entre emissão de carbono de P4 e solução comercial	75

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento geral

A utilização de técnicas de construção e materiais sustentáveis é crucial em nossa realidade atual. O setor da construção civil é um dos que mais provoca impacto ambiental, especialmente devido a geração de entulhos e resíduos, bem como aos danos causados ao meio ambiente pelos métodos de extração de matéria prima.

A evolução da tecnologia e o desenvolvimento contínuo de materiais têm aberto portas para a exploração de matérias já existentes e com propriedades inovadoras, incluindo materiais sustentáveis com características que contribuem para o isolamento acústico.

De acordo com a Agência Europeia do Ambiente, a exposição prolongada ao ruído causa anualmente 41.000 novos casos de doenças cardíacas e 11.000 mortes prematuras na Europa (S/a, Diário de Notícias, 2023). A crescente preocupação com os efeitos adversos dos sons urbanos intensos tem despertado um interesse cada vez maior, devido às suas consequências negativas no bem-estar físico, mental e social dos indivíduos. Em termos físicos, isso abrange desde danos nos órgãos auditivos até perturbações na circulação sanguínea e nos ritmos cardíacos, além da indução de fadiga. A nível psicológico, os sintomas associados incluem irritação, estresse e desconforto, enquanto socialmente, o ruído atua como um obstáculo à comunicação eficaz.

Nesse contexto, o isolamento acústico desempenha um papel importante na atenuação do impacto sonoro proveniente de fontes externas, principalmente proveniente do ruído de tráfego, bem como fontes internas dentro de um edifício. Através da utilização de materiais e técnicas de isolamento eficazes, é possível reduzir significativamente a transmissão do ruído, proporcionando o conforto acústico dos espaços habitáveis.

Em relação aos diferentes tipos de sistemas construtivos, a construção pré-fabricada tem apresentado avanços significativos, especialmente com o uso de painéis sanduíche. Esse tipo de solução modular tem contribuído para a otimização do desempenho construtivo, a redução de prazos e de custos de construção, além de oferecer soluções mais sustentáveis e eficientes para o setor da construção civil (Capão, 2018).

## 1.2. Objetivo

Os objetivos dessa dissertação estão divididos em três vertentes:

- i. Avaliação do desempenho ambiental de painéis sanduíche, constituídos por fibras de madeira, com aplicações acústicas;
- ii. Avaliação experimental do desempenho acústico dos painéis;
- iii. Comparação dos painéis em estudo com soluções já existentes no mercado.

Ao ponderar tanto os aspetos acústicos quanto os ambientais, a intenção é contribuir significativamente para a seleção de materiais mais apropriados e para a concepção de ambientes que sejam simultaneamente acusticamente confortáveis e sustentáveis.

## 1.3. Estrutura da tese

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, em que o primeiro corresponde a introdução, que contextualiza o tema escolhido, define os objetivos e esboça a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, “Revisão Bibliográfica”, é elaborado um resumo sobre desempenho ambiental, incluindo o conceito de ciclo de vida, e alguns conceitos fundamentais de acústica. Esse capítulo também discute materiais sustentáveis disponíveis atualmente, assim como painéis modulares.

O terceiro capítulo, “Metodologia”, é subdividido em três subcapítulos. Inicialmente, é realizada a caracterização dos painéis a serem estudados, seguida pela descrição da metodologia para a Análise de Ciclo de Vida, que avaliará as emissões de dióxido de carbono durante a produção dos painéis, e as metodologias experimentais e de previsão para a avaliação do desempenho acústico.

No quarto capítulo, são aplicados os conceitos discutidos no capítulo anterior. Aqui, são expostos os resultados e análises das emissões, bem como os índices de redução sonora, tanto experimentais quanto de previsão. Além disso, os resultados são comparados com soluções existentes no mercado e é realizada uma análise sucinta.

Por último, o quinto capítulo aborda as considerações finais e apresenta uma breve conclusão sobre todo o trabalho realizado, incluindo sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. DESEMPENHO AMBIENTAL

#### 2.1.1. Sustentabilidade na Construção Civil

A construção sustentável está diretamente ligada à aplicação dos princípios do desenvolvimento sustentável, em que o principal objetivo é “dar resposta às necessidades da geração presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir as suas” (WCSD, 1987).

A Agenda 21 trata-se de um documento que teve grande importância e incentivou a utilização das práticas do desenvolvimento sustentável na construção civil. Este documento, produzido durante a ECO-92, combina métodos de dimensões ambientais, sociais, econômicos e culturais (Corrêa, 2009).

É considerada uma construção sustentável aquela que utiliza alguns princípios de sustentabilidade, que visam a minimização do consumo de recursos, maximização da reutilização de recursos, a utilização de recursos renováveis e recicláveis, a proteção do ambiente natural, a criação de um ambiente saudável e não tóxico, e a criação de um ambiente construído de qualidade (Queiroz, 2016).

A Figura 1 apresenta as prioridades que devem ser adotadas em uma construção sustentável.



Figura 1-Resumo Construção Sustentável (Mateus, 2009)

A indústria da construção ainda se baseia em processos de construção tradicionais, caracterizados pelo consumo excessivo de matérias-primas, recursos energéticos não renováveis e pela demasiada produção de resíduos. Minimizar a geração de resíduos é um dos principais meios de reduzir o impacto ambiental.

A adoção de técnicas e práticas sustentáveis desde a fase do anteprojecto, como mostra a Figura 2, garante uma redução dos impactos nas fases de construção e utilização, pelo que é importante a sensibilização da sociedade para o uso racional dos recursos naturais (Mateus, 2009).

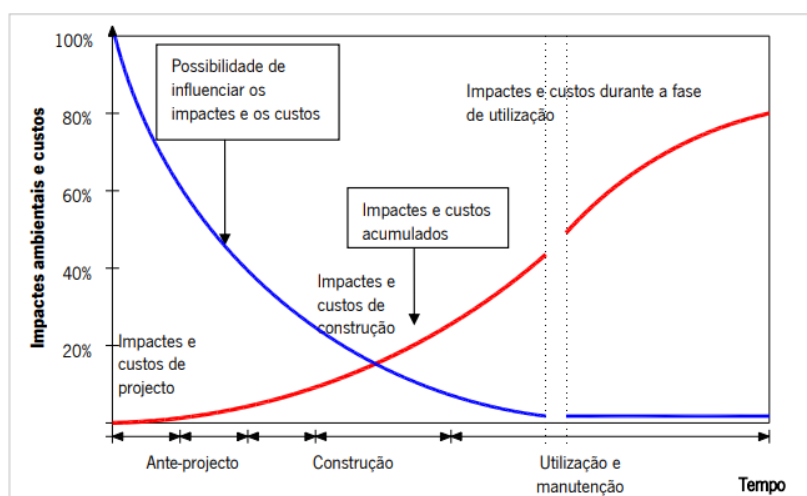


Figura 2- Influência das decisões tomadas nas várias fases do ciclo de vida de um edifício (Mateus, 2009 apud Kohler & Moffatt, 2003).

### 2.1.2. Análise do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método que permite mensurar os potenciais impactos ambientais de produtos ou serviços. Por ser uma metodologia quantitativa, ela possibilita a comparação entre produtos semelhantes. A análise poderá ser feita a partir de multicritérios, sendo eles sociais, ambientais e económicos, e compreende o ciclo de vida completo do produto ou serviço, desde a extração da matéria-prima até à distribuição final, o que justifica o termo “do berço ao túmulo” (Oliveira, 2021), conforme indica a Figura 3.

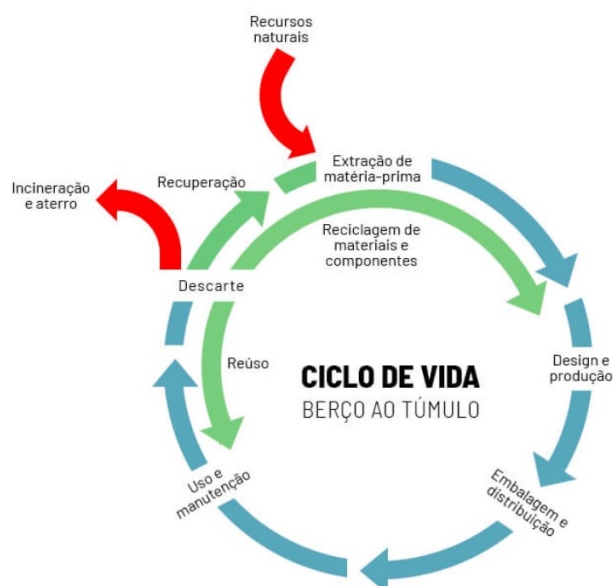


Figura 3- Esquema ACV (Oliveira, 2021 adaptado de UNEP)

A ACV viabiliza a identificação de pontos críticos ambientais de um produto, suporte às tomadas de decisões e oportunidades de melhorias ao longo do seu ciclo de vida. Isso possibilita a adoção de práticas mais sustentáveis, como a substituição de materiais por opções recicláveis ou a otimização de processos de produção para reduzir o consumo de energia e as emissões de gases poluentes (Oliveira, 2021). Conforme André (2014), a análise permite avaliar se o ciclo de vida gera algum tipo de impacto, seja econômico ou ambiental.

De acordo com a norma ISO 14040, a análise de ciclo de vida inclui quatro etapas, sendo elas: “Definição de objetivo e âmbito”; “Análise de inventários”; “Análise de impactos”; e “Interpretação”.

É durante a primeira fase da ACV, conhecida por “Definição de objetivos e âmbito”, que são estabelecidas as fronteiras do sistema, com os pressupostos e propósito de uso do estudo, o público-alvo ao qual ele se destina, as necessidades relacionadas aos dados e sua qualidade, e as categorias de impacto (Quintas, 2015).

Quando a ACV é aplicada para comparar produtos ou materiais, deve ser definida uma unidade funcional adequada e que permita definir uma medida de equivalência de cada um dos produtos. A unidade funcional é necessária para garantir a comparabilidade dos resultados e nada mais é do que uma medida do desempenho das saídas funcionais do sistema do produto.



Na segunda fase, é onde acontece a “Análise de inventários”, em que é feita a coleta e tratamento de dados, incluindo todas as entradas e saídas ambientais. É nesta fase que ocorre a quantificação do material e de energia que entram e saem de uma unidade de processo, ou seja, o consumo de energia e as emissões no ar, na água e no solo, associadas a todas as etapas do ciclo de vida (Quintas, 2015).

A terceira fase, de “Avaliação de impactos”, refere-se à percepção da relevância do impacto ambiental através da multiplicação dos valores brutos por fatores de equivalência que entregam os resultados em unidades comuns (Quintas, 2015).

A avaliação dos potenciais impactos ambientais compreende uma série de passos essenciais para uma análise abrangente, que incluem: a seleção das categorias de impacto, indicadores de categorias e modelos de caracterização, delineando o escopo da avaliação; o alinhamento dos resultados obtidos no inventário com as categorias de impacto previamente escolhidas, um processo de classificação que proporciona uma estrutura coerente para a análise; o cálculo dos resultados dos indicadores de categorias, marcando a fase de caracterização, na qual se busca quantificar e compreender os impactos ambientais identificados. Essa sequência forma uma abordagem sistemática e visa fornecer *insights* valiosos sobre o panorama ambiental relacionado ao produto ou processo em avaliação (Faria, 2018).

Na fase final, denominada “Interpretação de resultados”, realiza-se a avaliação dos resultados tanto da análise de inventário quanto de impacto, com o objetivo de selecionar o produto e processo. Essa escolha é feita levando em consideração uma assimilação das incertezas e pressupostos que deram origem aos resultados, proporcionando uma decisão embasada e consciente (Quintas, 2015).

No final desta fase, é possível atuar na resolução de eventuais problemas e fazer a análise comparativa entre os resultados obtidos e os dados fornecidos. Vale ressaltar que as quatro fases da ACV são interdependentes, e os dados coletados têm impacto direto na fase seguinte. A Figura 4 esquematiza de forma clara a interdependência de todas as fases.

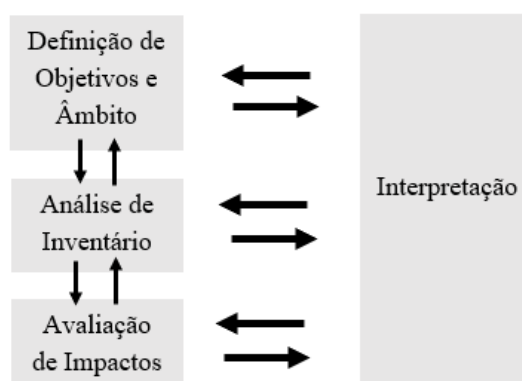


Figura 4- Estrutura da ACV (adaptado de ISO 14040, 2006)

O surgimento contínuo de novas fontes de dados, pesquisas, avanços científicos, métodos de manufatura e materiais reflete a rápida evolução da pesquisa e desenvolvimento. Essa dinâmica representa um desafio na busca de informações confiáveis e atualizadas no decorrer do desenvolvimento de uma Análise do Ciclo de Vida (ACV).

No entanto, existem estratégias para mitigar essas questões. A ACV frequentemente abrange diversos estágios de um processo, desde a extração de materiais até o processamento e a manufatura. Ao isolar e identificar a fase impactante ao meio ambiente, torna-se possível reduzir esse impacto, concentrando-se exclusivamente nessa etapa específica. Esse enfoque simplifica a ACV como um todo, pois apenas analisa uma fase do processo, ao mesmo tempo em que oferece resultados significativos e valiosos. Essa abordagem não só facilita a interpretação dos resultados, mas também direciona esforços de melhoria para áreas específicas e contribui para decisões mais sustentáveis (Valle, 2019).

Atualmente, há uma série de análises e pesquisas abordando o ciclo de vida de materiais aplicados na construção civil. Tal como é o caso de Demarzo e Porto (2007), que realizaram um estudo de análise de ciclo de vida, englobando todas as etapas do uso da madeira, com o objetivo de verificar os aspectos ambientais e os possíveis impactos associados a esse material. Além do mais, foi feita uma comparação com outros materiais frequentemente utilizados na construção civil, como a madeira, o aço e o betão.

A Tabela 1 a seguir apresenta os resultados relativos ao consumo de energia, emissão de gás carbônico, poluição do ar, resíduos sólidos e impacto ambiental durante a fabricação dos três materiais, tendo por base a madeira.

Tabela 1-Comparação na fabricação da madeira, aço e betão (Demarzo e Porto, 2007)

Material	Consumo de energia	Emissão de CO <sub>2</sub>	Poluição do ar	Resíduos Sólidos	Impacto ambiental
Madeira	X	X	X	X	X
Aço	2,40 X	1,45 X	1,42 X	1,36 X	1,16 X
Concreto	1,70 X	1,81 X	1,67 X	1,96 X	1,97 X

Os resultados revelam que a madeira e seus derivados apresentam consideráveis benefícios ambientais e indicam que a utilização da madeira pode impulsionar a competitividade e o uso sustentável desse material no setor da construção (Demarzo e Porto, 2007)

### 2.1.3. Declarações Ambientais de Produto (DAP)

A conscientização da indústria em relação aos impactos ambientais dos produtos está em constante crescimento, assim como a demanda por informações sobre o desempenho ambiental por parte dos usuários. Assim como na escolha dos materiais para uma construção sustentável, é crucial evitar abordagens casuísticas e garantir uma avaliação abrangente de todos os impactos ambientais associados a cada material (Quintas, 2015).

Dessa forma, surgiram diversas ferramentas que facilitam a declaração do desempenho ambiental de um produto por parte do fabricante. As declarações ambientais de produto (DAP) são ferramentas objetivas e precisas, que fornecem informações fundamentadas na ACV do produto, com base nos fluxos de entrada e saída. Essas declarações oferecem informações sobre os aspectos ambientais dos produtos e facilita sua caracterização ambiental. Ao registrar as DAP, abre-se a oportunidade de identificar e reduzir os impactos negativos através de melhorias no processo de produção (Moreira, 2015).

As DAP são estruturadas em três partes distintas. Na primeira seção, são detalhados os produtos e seus fabricantes. A unidade funcional, que reflete a função real do produto, pode ser definida tanto nesta parte quanto na segunda. A segunda parte abrange a informação ambiental, como a descrição do desempenho ambiental de um produto por meio da ACV, desde a extração até a disposição final do produto. A terceira e última seção engloba informações sobre a empresa, como nome e endereço, o organismo de certificação e o período de validade da declaração.

É importante destacar que as DAP estão em conformidade com as normas ISO 14025 e EN 15804. Geralmente, essas declarações são elaboradas por iniciativa própria de empresas e incluem informações abrangentes sobre os produtos e a ACV. Esses dados são validados por uma terceira parte independente, tornando-se uma ferramenta eficaz de comunicação do desempenho ambiental de um produto ao longo de seu ciclo de vida. Assume-se que deve ser reportado, no mínimo, as etapas que se referem do “berço ao portão”, ou seja, a etapa do produto (Moreira, 2015).

Nas declarações ambientais, as etapas do ciclo de vida são representadas em módulos, conforme a Tabela 2 a seguir:

Tabela 2- Etapas do ciclo de vida representada por módulos (Moreira, 2015)

Módulos		Informação de cada módulo
<b>Módulo A1-A3</b> Etapa do produto	A1 – Extração e processamento de matérias-primas	A etapa produto finaliza quando o produto está pronto para entrega. A emissão de calor residual encontra-se associado indiretamente ao consumo de energia e, como tal, não necessita de ser declarada. Os resíduos que são reintroduzidos no processo produtivo substituem matérias-primas primárias e, como tal, têm de ser incluídas nos limites do sistema.
	A2 – Transporte	
	A3 – Produção	
<b>Módulo A4-A5</b> Etapa do processo de construção	A4 – Transporte	Corresponde à etapa do processo de construção e é uma etapa opcional que inclui informação sobre o transporte do produto para o local de construção e a sua instalação no edifício.
	A5 – Processo de construção e instalação	
<b>Módulo B</b> Etapa de utilização	B1 – Utilização	O Módulo B representa a etapa de utilização e também é uma etapa opcional. Esta etapa abrange o período desde a entrega do edifício ou trabalho de construção até a sua demolição.
	B2 – Manutenção	
	B3 – Reparação	
	B4 – Substituição	
	B5 – Reabilitação	
	B6 – Energia consumida em fase operacional	
	B7 – Água consumida em fase operacional	
<b>Módulo C</b> Etapa de fim de vida	C1 – Desconstrução e demolição	Representa a etapa de fim de vida do produto. Esta etapa tem início quando o produto é substituído, desconstruído ou demolido, não apresentando qualquer funcionalidade.
	C2 – Transporte do produto	
	C3 – Processamento de resíduos	
	C4 – Eliminação dos resíduos	
<b>Módulo D</b> Benefícios e cargas ambientais para além da fronteira do sistema	D – Potencial de reutilização, reciclagem e valorização	Refere os benefícios ou cargas para o ambiente que são gerados pelos produtos reutilizáveis, materiais recicláveis e transferência de energia para o exterior do sistema de produto.

Conforme estabelecido pela norma NP 15804, as declarações ambientais de tipo III (DAP) fornecem a quantificação de informações ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto, o que possibilita comparações entre produtos que desempenham a mesma função. Além das DAP, há mais dois tipos de declarações ambientais. As do tipo I são atribuídas aos rótulos ecológicos, e seguem critérios estabelecidos por parte independente. Por outro lado, as do tipo

II consistem em autodeclarações realizadas pelas próprias organizações, focadas em descrever exclusivamente o aspecto ambiental do produto, sem abranger a avaliação do ciclo de vida para reduzir os custos associados (Valle, 2019).

As DAP fundamentam-se em diretrizes para caracterização dos aspectos ambientais, conhecidas como Regras de Categoria de Produto (RCP). Conforme estipulado pela norma ISO 14025, os RCP devem possuir uma estrutura que delinhe o propósito e o escopo com base na ACV para uma categoria específica de produto.

A revisão e atualização de uma Declaração Ambiental de Produto (DAP) são recomendadas para incorporar evoluções tecnológicas ou outras circunstâncias que possam impactar o conteúdo e a precisão da declaração. Contudo, caso não ocorram alterações significativas ao término do período de validade, estipulado pela norma como cinco anos a partir da data de publicação, não é obrigatório proceder à recriação da DAP, apenas atualizar as informações é suficiente (Quintas, 2015).

Em Portugal, há um sistema denominado DAP Habitat, desenvolvido no contexto de um projeto SIAC (Iniciativa de Transferência de Conhecimento), para desenvolver um sistema de verificação de registo das declarações ambientais de produtos, específicos para produtos do habitat. A configuração e organização desse sistema estão detalhadas na Figura 5. Este sistema representa uma iniciativa relevante no cenário nacional para promover a transparência e a sustentabilidade nos produtos relacionados ao ambiente habitacional (DAPHabitat, 2023).

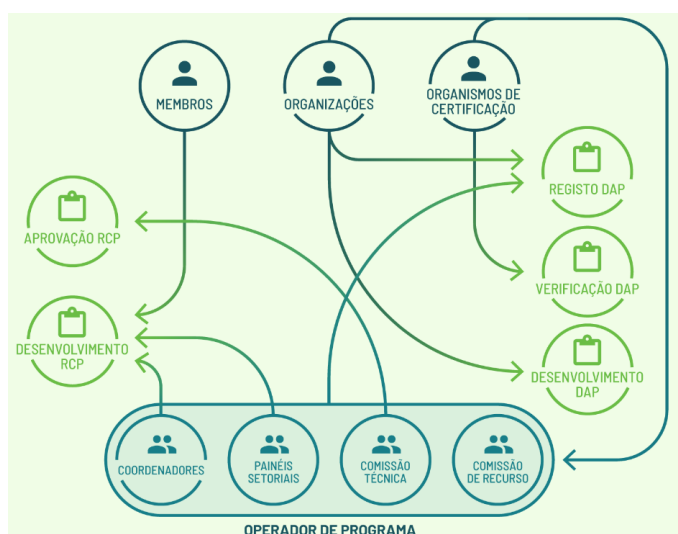


Figura 5- Estrutura do sistema DAPHabitat (DAPHabitat, 2023)

As declarações ambientais de produto (DAP), ou Environmental Product Declarations (EPD) em inglês, são disponibilizadas por uma variedade de fabricantes de diferentes partes do mundo, e podem ser encontradas de forma gratuita na internet. A ampla acessibilidade dessas declarações permite que consumidores, profissionais da indústria e outros interessados tenham acesso fácil a dados transparentes e baseados em fatos sobre o impacto ambiental de produtos específicos, contribuindo assim para uma tomada de decisão mais sustentável e informada.

## **2.2. DESEMPENHO ACÚSTICO**

### **2.2.1. Som e Ruído**

Segundo Bistafa (2011), o som é uma sensação produzida no sistema auditivo humano, enquanto o ruído é um som indesejável e desarmônico. O som é uma vibração que se propaga no ar a partir das vibrações das moléculas, provocando uma sensação auditiva quando atinge o indivíduo receptor. É um fenômeno ondulatório e, portanto, pode ser caracterizado por sua amplitude, frequência, comprimento de onda e período.

O ruído causa efeitos negativos no bem-estar físico, mental e social, e a sua caracterização pode ser feita pela frequência e sua amplitude medida pelo Nível de Pressão Sonora, que representa a variação de pressão no ar obtida pelas ondas sonoras, ou seja, a diferença entre a pressão atmosférica ambiente e a pressão atmosférica em repouso (Tadeu et al, 2010).

Em relação à percepção do som, o ouvido humano é mais sensível a altas e médias frequências, que estão entre os 20 Hz e 20 kHz. Devido à extensão da escala, as medições são tratadas em bandas de frequência, para facilitar o processo. As bandas mais comumente usadas são de oitavas e de um terço de oitava (APA, 2004).

A gama de pressões sonoras às quais o ouvido humano é sensível também é bastante ampla, o que torna impraticável o uso da unidade de referência - Pascal (Pa). Portanto, utiliza-se uma escala logarítmica de Nível de Pressão Sonora, em decibéis (dB) (APA, 2004).

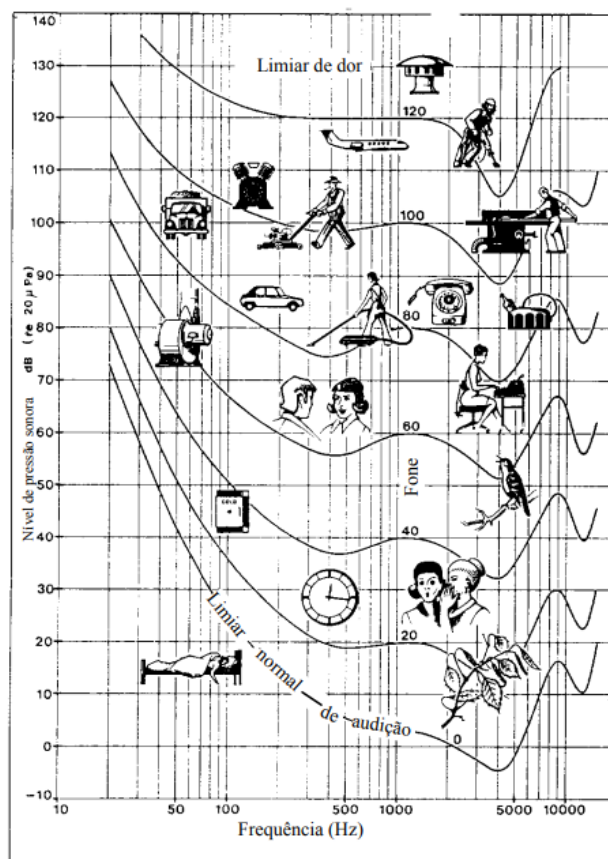


Figura 6- Tipos de ruído e resposta do ouvido humano (Tadeu et al, 2010)

Em medições de ruído, com o objetivo de avaliar a resposta do ouvido humano, são empregadas quatro curvas de ponderação, denominadas A, B, C e D. Essas curvas levam em consideração a sensibilidade do ouvido humano a diferentes frequências, conforme mostra a Figura 7.

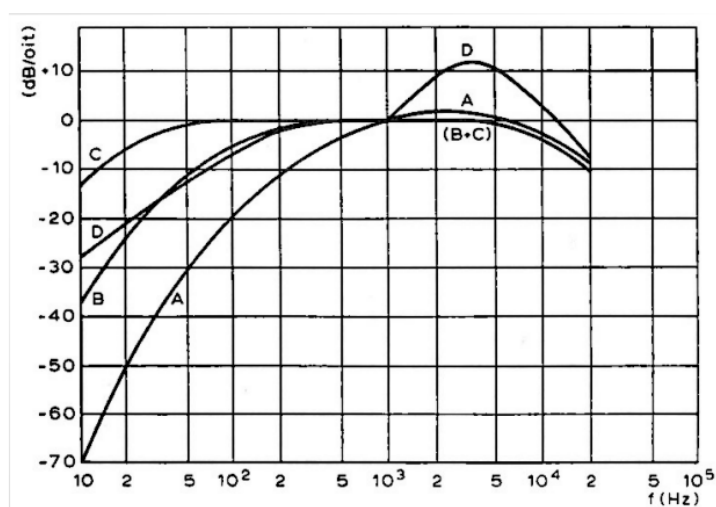


Figura 7- Curvas de ponderação da resposta do ouvido humano (Tadeu et al, 2010)

A curva de ponderação A é especialmente adequada para avaliar a percepção para níveis baixos de ruído, pois se correlaciona de forma mais precisa com o desconforto causado pelo sinal sonoro no ouvido humano, priorizando as faixas de frequências que são mais relevantes para a percepção do ruído e seus efeitos indesejáveis (Falcão, 2019).

A medição do ruído pode ser realizada por meio de um sonômetro, um equipamento especializado e projetado para captar e registrar os níveis de pressão sonora em diferentes frequências. A aplicação dos filtros no sinal que é registrado no equipamento, contribui para uma avaliação mais precisa da qualidade acústica dos ambientes e para o desenvolvimento de estratégias de controle de ruído mais eficazes.

### **2.2.2. Desempenho Acústico e Parâmetros para Requisitos Acústicos**

O conforto acústico está diretamente relacionado com a qualidade sonora em níveis adequados, com o objetivo de evitar desconfortos e incômodos causados pelo ruído. Por essa razão, é extremamente importante estudar e avaliar o desempenho acústico dos edifícios (Ferreira, 2016).

O desempenho acústico de um edifício compreende diversos aspectos, desde o isolamento acústico dos elementos construtivos, como paredes, pisos, tetos, vãos, até o controle de ruídos provenientes de sistemas de ventilação, equipamentos e fontes externas. Essas medidas visam proporcionar um ambiente tranquilo e em condições adequadas de conforto acústico aos ocupantes.

Ao realizar estudos e avaliações do desempenho acústico dos edifícios, é possível identificar pontos fracos onde ocorrem vazamentos sonoros, ruídos excessivos ou ressonâncias indesejáveis. Essa análise minuciosa proporciona a oportunidade de implementar medidas corretivas, como o uso de materiais isolantes, tratamentos acústicos específicos e projetos arquitetônicos adequados (Tadeu et al, 2010).

O desempenho acústico de edifícios está associado a alguns parâmetros de avaliação, como sons aéreos e de impacto, bem como à reverberação de espaços interiores e à avaliação do ruído emitido por equipamentos (Silva, 2014). No entanto, é importante destacar que os requisitos acústicos variam de acordo com o tipo de edifício, conforme previsto na legislação. No caso de edifícios residenciais, por exemplo, o tempo de reverberação não é levado em consideração.



### 2.2.2.1. Tempo de Reverberação ( $T_r$ )

De acordo com o Regulamento de Requisitos Acústicos de Edifícios (RRAE), o tempo de reverberação é definido como o intervalo de tempo necessário para que a energia do campo sonoro de um recinto fechado se reduza a um milionésimo do seu valor inicial.

O tempo de reverberação é um dos parâmetros mais utilizados na avaliação da qualidade acústica interior de espaços fechados. A medição do tempo de reverberação segue a norma NP EN ISO 3382-2, que descreve dois possíveis procedimentos: o método do ruído interrompido e o método da resposta impulsiva. No primeiro método, um altifalante é utilizado para criar um campo sonoro que, após alcançar um regime estacionário, é desativado abruptamente. Já o segundo método utiliza uma fonte impulsiva, como um balão ou um disparo de uma pistola para excitar a sala, e avalia a resposta impulsiva da mesma (Gomes, 2018).

A medição do tempo de reverberação deve ser realizada no compartimento receptor. Este parâmetro corresponde ao tempo, em segundos, necessário para que o nível de pressão sonora diminua em 60 dB, após o desligamento da fonte sonora, como mostra a Figura 8 (Tadeu et al, 2010).

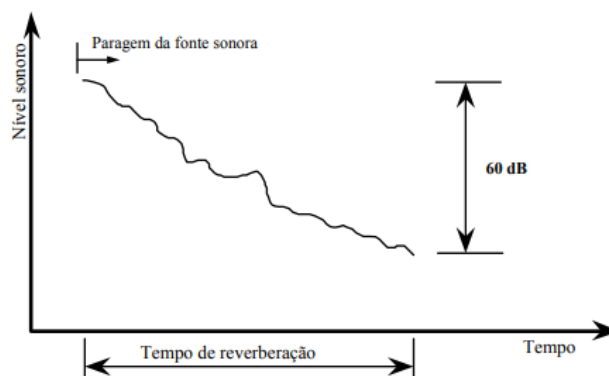


Figura 8- Tempo de reverberação (Tadeu et al, 2010)

A norma mencionada, NP EN ISO 3382-2, estabelece o número mínimo de pontos de medição e de medições, que depende do tipo de método a ser utilizado. Durante as medições, a fonte sonora deve ser mantida em uma ou mais posições, enquanto o microfone deve ser posicionado em locais distintos. O número mínimo de pontos de medição e de medições depende do método escolhido, seja ele de controlo, de engenharia (prático) ou de precisão (Silva, 2016).

Uma das maneiras de se prever o tempo de reverberação é pela fórmula de Sabine, que leva em consideração o volume do compartimento e área de absorção equivalente.

$$T_r = \frac{0,16 V}{\sum S_i \alpha_i},$$

em que,

V- Volume do compartimento, em m<sup>3</sup>;

S - Área da superfície i, em m<sup>2</sup>;

$\alpha$  - Coeficiente de absorção do material i;

Para cada tipo de ambiente, existe um valor ótimo para o tempo de reverberação, o qual varia de acordo com a atividade realizada e com o volume do espaço. O cálculo do tempo de reverberação ( $T_r$ ) permite a avaliação do nível de reverberação em um ambiente, a identificação de problemas acústicos e a busca por soluções que tornem o local acusticamente agradável, dentro dos padrões de inteligibilidade da fala (Andrade, 2021). A Figura 9 apresenta os valores ótimos em função do volume do recinto, para a frequência de 500 Hz.



Figura 9- Tempo de reverberação ótimo (Andrade, 2021)

### 2.2.2.2. Isolamento a Sons Aéreos

Conforme Ferreira (2016), o isolamento a sons aéreos desempenha um papel fundamental na redução das transmissões sonoras provenientes do ar e de ruídos externos indesejados. É necessário realizar análises detalhadas tanto para a transmissão entre compartimentos quanto para a transmissão pela fachada. Para isso, são feitas medições *in situ*.

No caso da transmissão entre compartimentos, esta pode ocorrer tanto por via direta quanto por via indireta, também conhecida como transmissão marginal. A transmissão direta ocorre com a propagação do som diretamente de um compartimento a outro, através dos elementos de separação, como paredes, pisos ou tetos. A redução da transmissão direta é feita através de materiais que promovem um isolamento acústico (Ferreira, 2016).

A transmissão indireta refere-se ao som que é transmitido através de caminhos indiretos, como aberturas de janelas, portas ou ventilação, ou das junções entre dois compartimentos, como ilustrado na Figura 10.

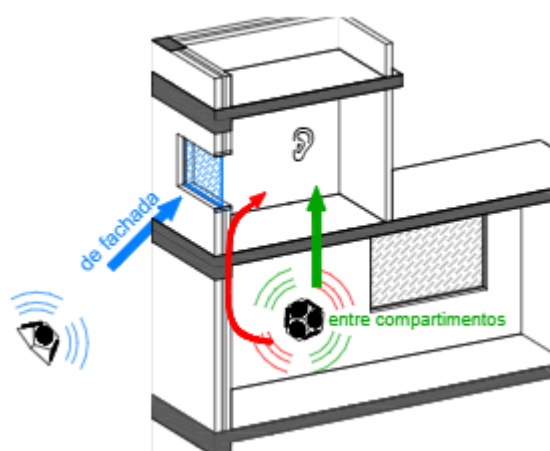


Figura 10- Caminhos de transmissão do ruído aéreo (Mateus, 2022)

É fundamental considerar ambas as formas de transmissão para garantir um isolamento acústico eficiente. No entanto, em ensaios em laboratório a contribuição da transmissão marginal não é considerada. Ela é contabilizada apenas nas medições *in situ*, que fornecem uma visão mais completa do desempenho acústico real do ambiente construído (Silva, 2014).

Aumentar a massa dos elementos de separação promove a minimização da propagação do ruído aéreo. Além disso, o uso de materiais absorventes ou a duplicação de paramentos, como substituir paredes simples por paredes duplas ou adotar tetos falsos, também contribuem para esse objetivo (Gomes, 2018).

### 2.2.3. Medições

As medições relacionadas com o desempenho acústico podem ser feitas em formas distintas: em laboratório, em obra (*in situ*) ou estimadas durante a fase de projeto (Tadeu et al, 2010).

No laboratório ocorre a caracterização dos elementos, soluções ou sistemas construtivos. São realizados testes e ensaios específicos para avaliar as propriedades acústicas dos materiais e componentes construtivos. Os resultados destes ensaios são fundamentais para a classificação do material em termos de isolamento e absorção sonora.

Na fase de projeto, são definidos os materiais e é feita a simulação e previsão do desempenho acústico através de software especializado em acústica. Essa verificação é importante, pois permite realizar ajustes e otimizar as soluções acústicas antes mesmo do início da construção.

Durante ou após a execução da obra, é imprescindível verificar o cumprimento das exigências regulamentares e a conformidade quanto aos requisitos acústicos aplicados. As medições realizadas *in situ* avaliam o desempenho acústico efetivo da construção.

### 2.2.4. Enquadramento legal

Em Portugal existem instrumentos legislativos para regular o ruído, como o Regulamento Geral do Ruído- Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de janeiro, que é complementado pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios- Decreto-Lei n.º 96/2008, de 9 de Junho, no caso específico de edifícios. Essas ferramentas são fundamentais para controlar e garantir o conforto acústico nos edifícios.

#### 2.2.4.1. Regulamento Geral do Ruído- RGR

O Regulamento Geral do Ruído estabelece as normas gerais do controle do ruído ambiental, e abrange diferentes tipos de atividades ruidosas, tanto temporárias quanto permanentes, e outras fontes de ruído que podem causar desconforto. Neste regulamento são estabelecidos os valores limites de exposição de acordo com a classificação da zona, que pode ser mista ou sensível (Silva, 2014).

Além disso, o RGR considera a elaboração de mapas de ruído municipais como ferramentas auxiliares na classificação das zonas e na elaboração de cartas de classificação. Esses mapas

ajudam a visualizar e compreender a distribuição do ruído em diversas áreas, e auxiliam no planejamento e na implementação de medidas de controle de redução de ruído. Com base na classificação da zona, são estabelecidos valores limites para os indicadores  $L_{den}$  e  $L_n$ , que devem ser estritamente respeitados.

#### **2.2.4.2. Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios- RRAE**

O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, aprovado pelo Dec. Lei n.º 129/2002, de 11 de Maio, com republicação através do Decreto-Lei n.º 96/2008, de 9 de Junho, estabelece as diretrizes relacionadas com o conforto acústico no contexto específico das edificações. Esse regulamento tem como objetivo principal melhorar a qualidade do ambiente acústico, considerando o ruído ambiente. Por meio de ensaios *in situ*, o regulamento verifica se os requisitos acústicos estão sendo atendidos (Gomes, 2018).

As normas que constam no regulamento podem ser aplicadas à construção, reconstrução, ampliação e alteração dos seguintes edifícios:

- a) Edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras;
- b) Edifícios comerciais e de serviços, e partes similares em edifícios industriais;
- c) Edifícios escolares e similares, e de investigação;
- d) Edifícios hospitalares e similares;
- e) Edifícios desportivos;
- f) Estações de transporte de passageiros;
- g) Auditórios e salas.

### **2.3. MATERIAIS SUSTENTÁVEIS PARA APLICAÇÕES ACÚSTICAS**

Os materiais de construção apresentados a seguir, Madeira, Cortiça, Fibras Naturais e Betão Sustentável, destacam-se por suas propriedades únicas e seu potencial para promover práticas construtivas mais sustentáveis.

#### **2.3.1. Madeira**

A madeira é um material com propriedades químicas, físicas e mecânicas únicas. Entre suas características mais relevantes, pode-se destacar: humidade, flexibilidade, durabilidade,

resistência, condutividade térmica e propriedades acústicas. Vale ressaltar que tais propriedades podem variar de acordo com a espécie da madeira, clima, solo e outros fatores influentes (Lima, 2022).

A versatilidade da madeira é evidente, e ela pode ser empregada de diferentes maneiras. No contexto das construções, seu uso pode ser temporário ou permanente. Em usos temporários, é comum encontrá-la em formas para concretagem, andaimes e escoramentos. Já em aplicações permanentes, a madeira é utilizada em estruturas de coberturas, esquadrias, forros, pisos, elementos decorativos e muito mais (Demarzo e Porto, 2007).

Além disso, é importante ressaltar que os resíduos da madeira também podem ser aproveitados de maneira consciente, contribuindo para a sustentabilidade e redução do desperdício. Por ser um material natural e renovável, a madeira possui a capacidade de ser reutilizada ao longo de sua vida útil, contribuindo para a economia de recursos e para a redução do impacto ambiental (Tenório, 2022).

De acordo com Lima (2022), o baixo consumo de energia durante o processo de produção da madeira deve-se, em parte, à sua disponibilidade abundante e ao processo de extração e transformação menos complexo em comparação com materiais sintéticos ou metálicos. No caso de materiais não renováveis, grandes quantidades de energia são consumidas e emitem grandes quantidades de gases de efeito estufa em sua produção.

No que diz respeito às propriedades acústicas, estas estão diretamente relacionadas com a densidade da madeira. Quanto maior a densidade, mais difícil a passagem de ondas sonoras, porém, menor a absorção acústica. Essa característica é particularmente relevante no contexto da utilização da madeira em aplicações relacionadas com o isolamento e absorção acústica (Neto, 2007).

Entretanto, é importante mencionar que também existem desvantagens associadas ao uso da madeira, e que devem ser consideradas. É um material vulnerável a agentes externos e pode sofrer alteração na sua composição, é combustível e possui dimensões limitadas. No entanto, com o avanço tecnológico e o conhecimento aprofundado das propriedades da madeira, já existem métodos para maximizar seus benefícios e mitigar esses efeitos negativos, tornando-a mais adequada para aplicações na construção (Coutinho, 1999).

Apesar das limitações, a madeira continua sendo um material amplamente utilizado na construção, devido às suas propriedades favoráveis em diversas áreas, incluindo a acústica.

### 2.3.2. Cortiça

Segundo Gonçalves (2014), Portugal produz cerca de 50% da cortiça mundial, o equivalente a cerca de 190.000 toneladas anuais, e é responsável por uma quota de 62% das exportações de cortiça no mundo. A cortiça é um material natural proveniente da casca exterior da árvore do sobreiro (*Quercus suber*), e suas características únicas proporcionam um bom desempenho como isolante térmico e eléctrico, além da alta capacidade de absorção vibrática e acústica.

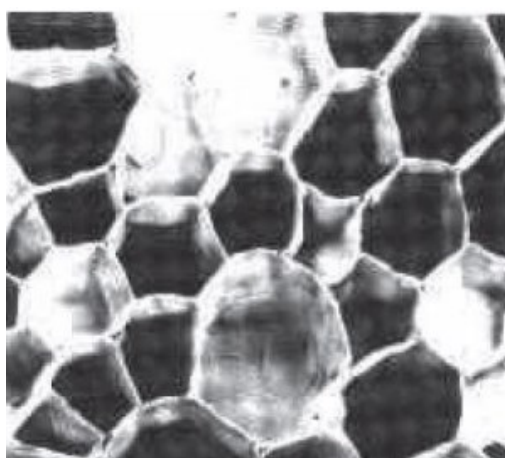


Figura 11- Estrutura da cortiça (Gonçalves, 2014)

A cortiça é um material poroso e a sua estrutura é capaz de absorver as ondas sonoras e dispersá-las, impedindo a propagação do som no ambiente. Sua baixa densidade torna-a leve, ao mesmo tempo que apresenta elevado nível de elasticidade, o que permite que a cortiça se adapte a diferentes superfícies e formas. Além do mais, a cortiça é impermeável a líquidos e gases (Batista, 2017).

Para a produção de aglomerados de cortiça, é aproveitado grande parte dos resíduos dos processos de transformação da cortiça natural, como a produção de rolhas. A cortiça usada nestes aglomerados tem diferenças de composição e é levado em consideração as diferenças no nível da pureza e das propriedades, o que exige uma linha de produção distinta para estes compostos (Gonçalves, 2014).

Conforme Batista (2017), o aglomerado expandido de cortiça é uma ótima solução para isolamentos térmicos, acústicos e vibráticos, e pode ser aplicado em revestimento de parede,

pisos e tetos. Outra aplicação do material é como amortecedor para reduzir a transmissão de vibrações provenientes de equipamentos, para as estruturas e fundações de construções.

O protagonismo de Portugal na produção de cortiça abre possibilidades promissoras para a utilização desse material ecológico, reciclável e biodegradável em diferentes aplicações.

### **2.3.3. Fibras Naturais**

As fibras naturais são extraídas de fontes renováveis e são classificadas como vegetais, animais ou minerais. A classificação das fibras vegetais é feita de acordo com sua origem, que pode ser proveniente de caules, folhas, sementes, frutos e troncos (Schuch et al, [s.d.]).

A fibra de coco é um recurso natural que possui diversas possibilidades de aplicação, cujo uso possibilita a valorização de um material que, de outra forma, seria descartado. (Schuch et al, [s.d.]). Suas propriedades térmicas e acústicas tornam-na uma escolha recorrente na aplicação em compósitos, sendo utilizadas na fabricação de produtos para piso, parede, teto, e revestimento externo de fachadas, mas, neste caso, desde que este receba um tratamento específico para viabilização da aplicação (Vasconcelos, 2020).

Quando aplicadas em pisos, a manta de fibra de coco pode ser utilizada de duas formas: entre as lajes, abaixo do contrapiso, ou sob o piso laminado. Ambas têm função similares, onde o objetivo é evitar a transmissão mecânica de ondas sonoras produzidas pelo impacto direto com o piso (Vasconcelos, 2020). Painéis acústicos produzidos a partir da fibra de coco também são comumente utilizados.

Segundo Schuch (apud Souza, 2015), as excelentes propriedades da fibra são resultantes do médio teor de celulose e do elevado teor de lignina, que influenciam na absorção de baixas frequências e na redução dos níveis sonoros.

Outros tipos de fibra também têm sido objeto de pesquisa para o isolamento acústico, como é o caso da fibra de bananeira, que apresenta bons resultados quando comparada a outros materiais utilizados para a mesma finalidade, como lã de vidro, lã de rocha, fibras de coco e um produto comercial chamado de Sonex®, espuma fabricada a partir da fibra de coco. (Demarchi, 2010). A Figura 12 seguir apresenta a variação da absorção sonora em função da frequência para todos os materiais mencionados. É notável que a fibra de bananeira apresenta resultados



muito semelhantes a lã de rocha e lã de vidro, o que indica um grande potencial para esta aplicação e uma alternativa às opções tradicionais.

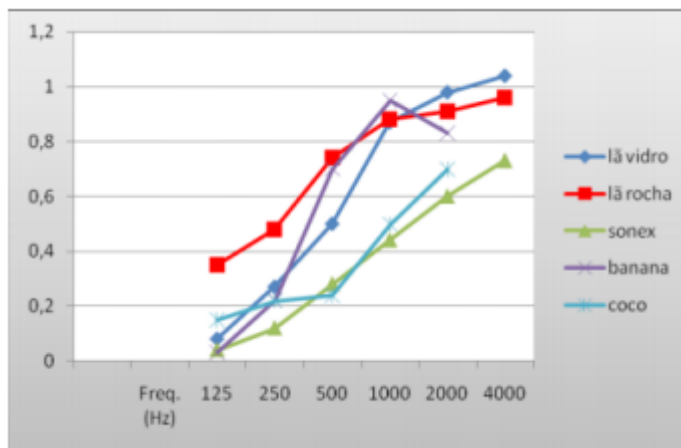


Figura 12- Variação de absorção sonora em função da frequência (Demarchi, 2010)

Além das fibras já mencionadas, a fibra de madeira também se destaca como um isolante acústico eficaz. Rocha et al (2021) desenvolveu uma pesquisa relacionada à produção de placas de gesso sustentáveis, utilizando resíduos como o babaçu, uma espécie de palmeira multifuncional nativa da região norte do Brasil. Essa abordagem representa uma alternativa viável para gerenciar os resíduos urbanos e industriais, potencialmente estimulando a produção de novos materiais de forma sustentável e contribuindo para a redução dos impactos ambientais.

A pesquisa se concentrou na aplicação e produção de placas de gesso incorporando fibras de babaçu como componente complementar e sustentável. Os resultados obtidos foram promissores, demonstrando um impacto significativo no desempenho acústico. No entanto, o estudo continua em desenvolvimento para otimizar ainda mais o reaproveitamento das fibras residuais (Rocha, Silva e Sá, 2021).

#### 2.3.4. Betão Sustentável

O betão é um material composto, formado por cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo, e pode ser aprimorado com adições e aditivos químicos para melhorar ou modificar suas propriedades básicas. Sua versatilidade de aplicação justifica sua ampla utilização em diversas estruturas de construção, tais como edifícios de múltiplos pavimentos, pontes, viadutos, portos, reservatórios, barragens, pisos industriais, pavimentos rodoviários, aeroportos, paredes de contenção, entre outros. No entanto, o seu uso excessivo na construção

civil tem consequências ambientais, tanto no processo de obtenção de matérias-primas quanto no processo de fabricação (Souza e Morais, 2019).

Uma alternativa para atenuar o impacto ambiental do betão é o uso do betão leve, especialmente adequado para situações de baixa carga estrutural. Para produzi-lo, podem ser incorporadas pérolas de EPS em substituição aos adregados graúdos. O EPS é um material plástico rígido resultante da polimerização do estireno em água, muito utilizado na construção civil.

As pérolas de EPS, utilizadas na produção do betão leve, podem ser obtidas a partir dos resíduos gerados na própria construção, o que proporciona uma destinação ambientalmente responsável aos plásticos que, frequentemente, são descartados em aterros ou lixões, onde levam muito tempo para se degradar. A incorporação do EPS como agregado no betão confere características atrativas ao betão, como leveza e bom isolamento termoacústico (Souza e Morais, 2019).

Dessa forma, a utilização consciente do betão leve com EPS oferece uma opção sustentável a construção, e favorece a preservação do meio ambiente a partir da reutilização de resíduos.

## **2.4. PAINÉIS MODULARES**

Os métodos construtivos tradicionais muitas vezes são ineficientes devido à complexidade das atividades e fases envolvidas. Nesse contexto, a pré-fabricação tem-se destacado como uma solução que traz diversos benefícios para o processo construtivo. A construção pré-fabricada incorpora conceitos que compreendem os aspetos ambientais, desde o desenvolvimento do produto, o que contribui para a redução do impacto ambiental negativo ao longo de todas as fases do ciclo de vida do produto (Pires, 2013).

Os elementos modulares são produzidos em fábrica e posteriormente transportados e montados no local da implantação. Esse tipo de solução pode resultar em redução nos custos devido à produção em série e na adoção de sistemas de controle de qualidade mais eficazes. Em relação ao processo de montagem, muitas vezes o sistema de montagem é simplificado, dispensando a necessidade de uma grande mão de obra, o que também reduz os custos (Almeida, 2009).

Um exemplo de pré-fabricado é o painel sanduíche, um compósito resultado da combinação de duas ou mais camadas. A estrutura é composta por duas lâminas finas, rígidas e resistentes de

material denso, separadas por uma camada de um material de baixa densidade, que pode ser menos rígido e resistente comparado com as lâminas (Capão, 2018).

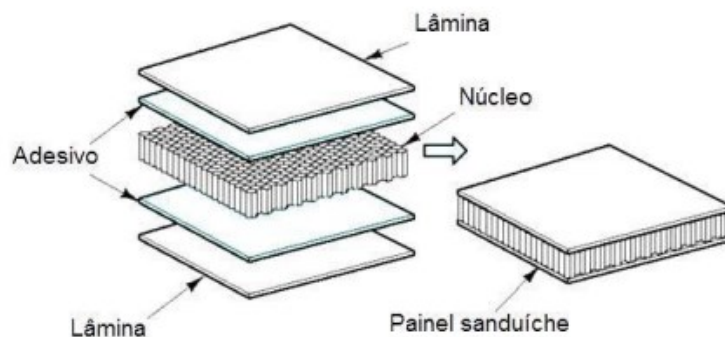


Figura 13- Constituição de um painel sanduíche (Almeida, 2009)

Atualmente já existe uma grande diversidade de materiais e configurações, mas, constantemente, são propostos e utilizados novos materiais e novas combinações de materiais existentes.

De acordo com Almeida (2009), os painéis sanduíche podem apresentar diferentes tipologias e formas estruturais, dependendo da combinação de diferentes formas do material de núcleo, que pode ser homogêneo, não homogêneo ou estruturado. A Figura 14, a seguir, esquematiza os tipos de núcleos que podem ser utilizados.

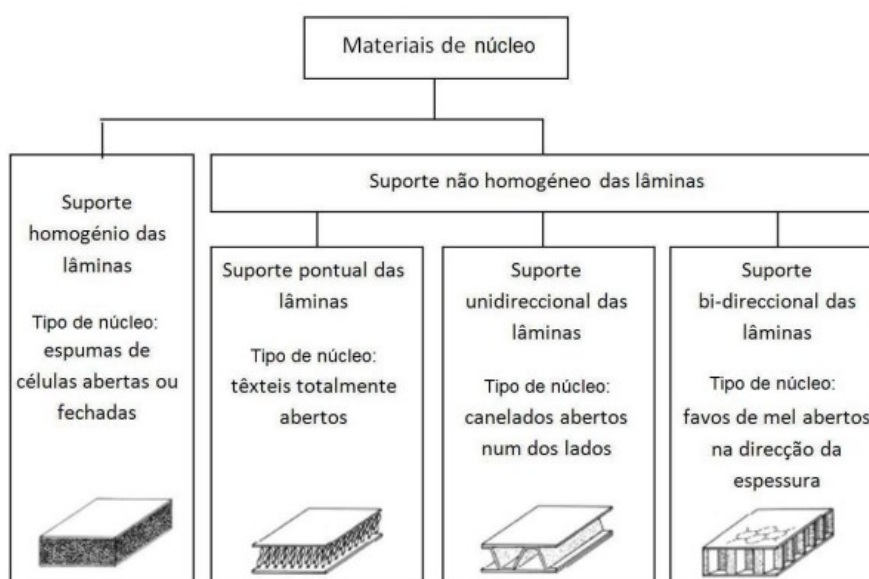


Figura 14- Materiais de núcleo em painéis sanduíche (Almeida, 2009)

Ao escolher o material que irá compor o núcleo, devem ser considerados diferentes fatores como desempenho mecânico, processo de fabricação, propriedades térmicas e acústicas, fatores econômicos, entre outros.

As lâminas devem atender a requisitos funcionais essenciais. É necessário garantir sua estanqueidade à água, ao vapor de água e proporcionar um isolamento sonoro eficaz. Em termos estruturais, as lâminas devem ter resistência adequada para suportar as cargas solicitadas e resistir ao fogo. Quando há presença de armaduras de aço, a qualidade do betão e a espessura do recobrimento devem ser suficientes para evitar a corrosão. A rigidez da secção e a resistência dos materiais constituintes devem ser projetados de forma a assegurar a estabilidade do painel, tanto para os estados limites de utilização quanto para os estados limites últimos. Esses critérios são fundamentais para assegurar a segurança e durabilidade dos painéis (Almeida, 2009).

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada para avaliar o desempenho ambiental e acústico de soluções construtivas, focando especificamente nos painéis sanduíche abordados neste trabalho. Este processo será dividido em três subcapítulos distintos. O primeiro aborda os diferentes tipos de painéis que foram utilizados como objeto de estudo neste trabalho. O segundo é dedicado à análise do ciclo de vida desses painéis, com o objetivo de avaliar o impacto ambiental do produto. Por fim, o terceiro subcapítulo trata dos ensaios acústicos, cujo propósito é determinar isolamento sonoro e o índice de redução sonora ponderado ( $R_w$ ).

#### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES

As amostras foram fornecidas por dois fabricantes distintos, identificados como fabricante 1 e fabricante 2 para preservar a confidencialidade de suas identidades. O fabricante 1, uma empresa especializada na fabricação de produtos pré-fabricados, forneceu os painéis sanduíche para revestimento e coberturas inclinadas. Enquanto isso, o fabricante 2, com expertise em materiais de construção de aço para telhados e paredes, cedeu o sistema de revestimento duplo e os painéis sanduíche para coberturas planas.

Conforme mencionado, os exemplares consistem em painéis sanduíche e um sistema de revestimento duplo. Todos os painéis possuem um núcleo isolante de fibras de madeira, com densidade de  $118,9 \text{ kg/m}^3$ .

##### 3.1.1. Painel Sanduíche de Revestimento – P1

Os painéis sanduíche de revestimento fornecidos pelo fabricante 1 têm as seguintes dimensões: 2670 mm de comprimento, 1125 mm de largura e 150 mm de espessura. Cada painel possui uma chapa de aço nervurada de 0,63 mm em uma face e uma de 0,50 mm na outra, além de uma camada interna de 150 mm de fibra de madeira. A segunda face (F2), como mostra a Figura 15, pode ser lisa, nervurada ou micro nervurada, e pode ter espessura total que varia de 50 mm a 150 mm. No caso da amostra fornecida, F2 é micro nervurada e tem 0,5 mm de espessura.

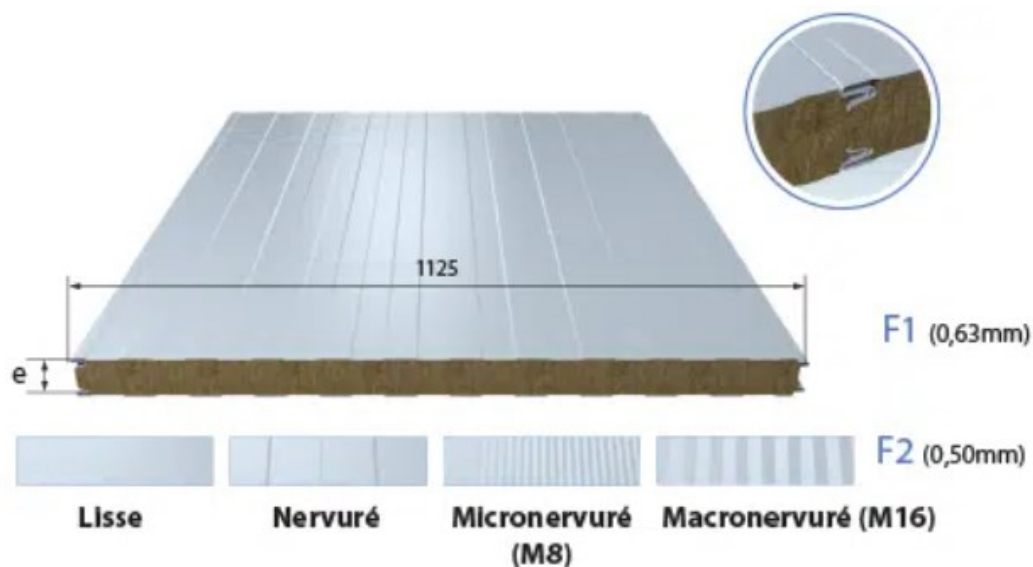


Figura 15- Dimensões do painel sanduíche de revestimento

### 3.1.2. Painel Sanduíche para Coberturas Inclinadas- P2

Os painéis de cobertura inclinada com núcleo isolante de fibras de madeira, também fornecidos pelo fabricante 1, possuem dimensões de 2670 mm de comprimento, 1000 mm de largura e 150 mm de espessura. Estes são revestidos com uma chapa de aço trapezoidal com 0,63 mm de espessura na face 1 (F1) e uma chapa de aço nervurada com 0,50 mm na face 2 (F2), e possui também uma camada interna de 150 mm de fibra de madeira.

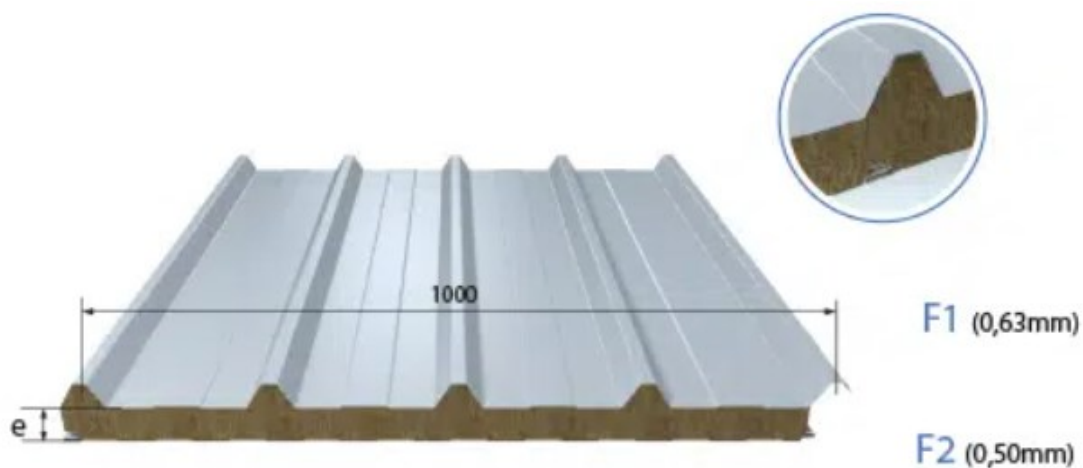


Figura 16- Dimensões do painel sanduíche para cobertura inclinada

### 3.1.3. Sistema de Revestimento Duplo- P3

O sistema de revestimento duplo é composto por bandejas de aço, camada de fibra de madeira revestidos com chapas e espaçadores de aço. As amostras foram fornecidas pelo fabricante 2 e cada bandeja possui dimensões de 3600 mm de comprimento e 500 mm de largura.

Para a montagem, foram então inseridas as camadas isolantes de fibra de madeira nas bandejas de aço, a primeira com 90 mm e a segunda com 120 mm, posicionada no topo da bandeja, entre três espaçadores verticais constituídos por perfis ômega de aço leve, com 120 mm de altura. A cobertura trapezoidal externa foi fixada a esses perfis.

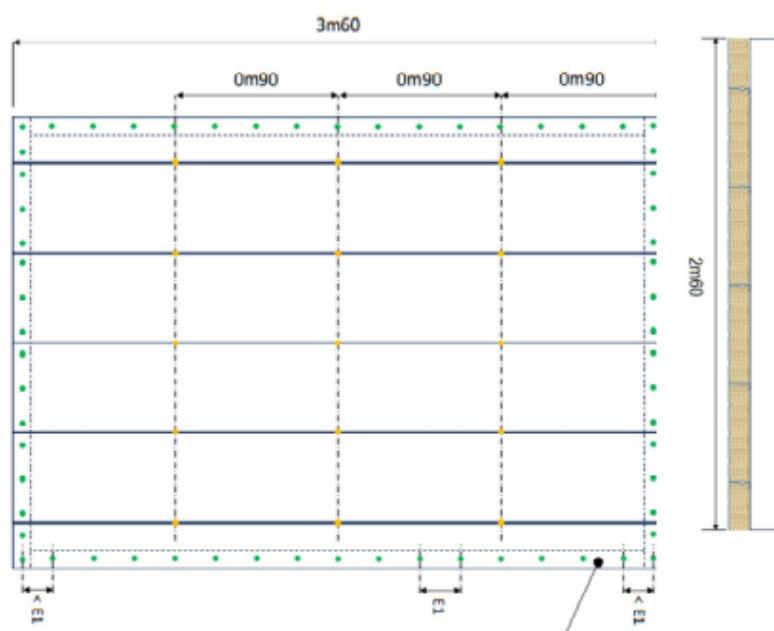


Figura 17- Dimensões do sistema de revestimento duplo



Figura 18- Montagem do sistema de revestimento duplo

O sistema foi submetido a testes em duas configurações distintas. Na primeira configuração, empregou-se um perfil de revestimento nervurado de 25 mm, enquanto na segunda, utilizou-se um perfil de revestimento nervurado de 40 mm.

#### 3.1.4. Painel Sanduíche para Coberturas Planas- P4

Os painéis para cobertura plana com núcleo isolante de fibras de madeira foram fornecidos pelo fabricante 2 e possuem dimensões de 2670 mm de comprimento, 1130 mm de largura e 200 mm de espessura. Estes são revestidos em chapa de aço com 0,50 mm de espessura de um lado e 0,60 mm do outro, com uma camada interna de 200 mm de fibra de madeira e outra de 50 mm de lã mineral.

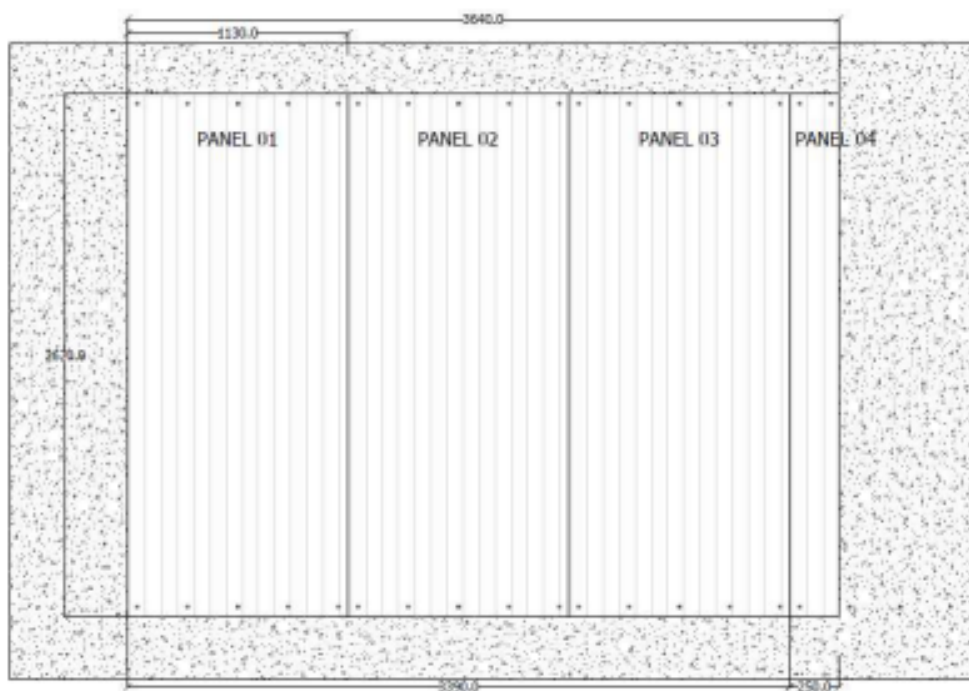


Figura 19- Dimensões do painel sanduíche para cobertura plana



## 3.2. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

Pretende-se avaliar as emissões de carbono decorrentes da produção dos quatro tipos de painéis em estudo, com base na análise do ciclo de vida dos produtos. Os resultados provenientes dessa análise desempenham um papel essencial ao guiar escolhas sustentáveis na seleção de materiais e processos na fabricação, com o intuito claro de reduzir as emissões de carbono ao longo de todo o seu ciclo de vida.

A metodologia abordada para a avaliação de impacto dos painéis segue a norma NP EN 15804+A1. Esta norma fornece uma estrutura que garante a elaboração, verificação e apresentação harmonizada de todas as Declarações Ambientais de Produtos (DAP) associadas a produtos, serviços e processos construtivos.

### 3.2.1. Definição do Escopo

A norma ISO 14040 preconiza que para o estudo da ACV, é essencial explicitar as funções do sistema a ser analisado. A unidade funcional serve como uma métrica do desempenho das saídas funcionais do sistema de produto, e estabelece a base de referência à qual as entradas e saídas estão vinculadas.

A unidade funcional ou unidade declarada utilizada para o cálculo do desempenho ambiental do produto varia conforme o tipo de material, sendo que, no entanto, o resultado do impacto é apresentado em quilogramas (kg). Essa padronização na apresentação dos resultados em quilogramas facilita a comparação direta entre diferentes produtos e materiais, e proporciona uma medida clara e universal para avaliação do impacto ambiental.

O objetivo principal dessa ACV é avaliar os impactos ambientais da produção de cada painel e compará-los com demais painéis que cumprem a mesma função. Para isso, é essencial que todas as características dos painéis e seus componentes sejam claramente definidas. Isso inclui a dimensão do painel e sua composição, como foi descrito no item 3.1.

### 3.2.2. Análise de Inventário

A etapa de análise de inventários concentra-se na recolha de informações relacionadas às diversas etapas do ciclo de vida dos produtos. Ao utilizar as Declarações Ambientais de Produto

(DAP) ou Environmental Product Declarations (EPD) como fontes de dados primárias para os componentes dos painéis, foi possível obter uma base sólida e quantitativa. Essas declarações proporcionam informações detalhadas e mensuráveis sobre o desempenho ambiental dos componentes, e servem como alicerce para a subsequente etapa de avaliação de impacto.

Os componentes de cada painel e as respectivas EPD/DAP utilizadas como base de dados encontram-se na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3- Componentes dos painéis e respectivas base de dados

COMPONENTES	DAP
<b>P1</b>	
2 chapas de revestimento em aço (0,5mm; 0,63mm)	ArcelorMittal “Cold Rolled Steel Coils”
Núcleo de fibras de madeira (150mm)	PAVATEX “Dry process wood fibre insulation 110-220 kg/m <sup>3</sup> ”
<b>P2</b>	
2 chapas de revestimento em aço (0,5mm; 0,63mm)	ArcelorMittal “Cold Rolled Steel Coils”
Núcleo de fibras de madeira (150mm)	PAVATEX “Dry process wood fibre insulation 110-220 kg/m <sup>3</sup> ”
Lã mineral (50 mm)	ROCKWOOL “Stone wool thermal insulation”
<b>P3</b>	
Bandeja de aço (0,75mm)	ArcelorMittal “Cold Rolled Steel Coils”
Núcleo de fibras de madeira (90 +120 mm)	PAVATEX “Dry process wood fibre insulation 110-220 kg/m <sup>3</sup> ”
Espaçador de aço (40-120-120-120-40 x 1,5)	ArcelorMittal “Cold Rolled Steel Coils”
Espaçador Ômega (30-20-60-20-30 x1,5)	ArcelorMittal “Cold Rolled Steel Coils”
Chapa de revestimento em aço (0,50 mm)	ArcelorMittal “Cold Rolled Steel Coils”
<b>P4</b>	
2 chapas de revestimento em aço (0,5mm; 0,63mm)	ArcelorMittal “Cold Rolled Steel Coils”
Núcleo de fibras de madeira (200 mm)	PAVATEX “Dry process wood fibre insulation 110-220 kg/m <sup>3</sup> ”
Lã mineral (50 mm)	ROCKWOOL “Stone wool thermal insulation”

Devido à ausência de bases de dados específicas para os espaçadores, optou-se por utilizar a mesma base de dados dos elementos em aço (ArcelorMittal “Cold Rolled Steel Coils”), aplicados em todos os painéis.

### 3.2.3. Avaliação de Impacto Ambiental

Os indicadores que descrevem as categorias de impacto ambiental utilizados para a avaliação seguem o “Quadro 3” da norma NP EN ISO 15804+A1, exposto a seguir na Tabela 4 .

Tabela 4- "Quadro 3- Parâmetros que descrevem os impactos ambientais" (NP EN ISO 15804+A1)

Categoria de impacto	Parâmetro	Unidade (expressa por unidade funcional ou por unidade declarada)
Depleção de recursos abióticos – elementos	Potencial de depleção (ADP-elementos) para os recursos abióticos não fósseis <sup>a)</sup>	kg de Sb equiv.
Depleção de recursos abióticos – combustíveis fósseis	Potencial de depleção (ADP-combustíveis fósseis) para os recursos abióticos fósseis <sup>a)</sup>	MJ, poder calorífico inferior
Acidificação do solo e da água	Potencial de acidificação do solo e da água, AP	kg de SO <sub>2</sub> equiv.
Depleção da camada de ozono	Potencial de depleção da camada de ozono estratosférica, ODP	kg de CFC 11 equiv.
Aquecimento global	Potencial de aquecimento global, GWP	kg de CO <sub>2</sub> equiv.
Eutrofização	Potencial de eutrofização, EP	kg de (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> equiv.
Formação de ozono fotoquímico	Potencial de formação de ozono troposférico, POCP	kg de Eteno equiv.
<sup>a)</sup> O potencial de depleção abiótico é calculado e declarado por dois indicadores diferentes: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ADP-elementos: inclui todos os recursos de materiais abióticos não renováveis (isto é, excetuando os recursos fósseis);</li> <li>▪ ADP-combustíveis fósseis: inclui todos os recursos fósseis.</li> </ul>		

No contexto deste trabalho, conforme mencionado anteriormente, o objetivo é a quantificação das emissões de carbono. Portanto, a análise restringiu-se apenas ao indicador “Potencial de Aquecimento Global (GWP)”.

Os impactos de cada indicador e de cada material são apresentados nas DAP, conforme ilustrado no exemplo da chapa de revestimento em aço, na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5- Apresentação dos resultados da análise de ciclo de vida para a chapa de revestimento em aço (EPD ArcelorMittal “Cold Rolled Steel Coils”)

LCA: Results																
DESCRIPTION OF THE SYSTEM BOUNDARY (X = INCLUDED IN LCA; MND = MODULE NOT DECLARED; MNR = MODULE NOT RELEVANT)																
PRODUCT STAGE			CONSTRUCTION PROCESS STAGE		USE STAGE							END OF LIFE STAGE				BENEFITS AND LOADS BEYOND THE SYSTEM BOUNDARIES
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport from the gate to the site	Assembly	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	De-construction demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recovery-Recycling-potential
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	MND	MND	MND	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	MND	MND	X	MND	X
RESULTS OF THE LCA - ENVIRONMENTAL IMPACT: 1 ton of cold rolled steel coil																
Parameter		Unit	A1-A3		C3		D									
Global warming potential		[kg CO <sub>2</sub> -Eq.]	2.38E+3		2.00E+0		-1.65E+3									
Depletion potential of the stratospheric ozone layer		[kg CFC11-Eq.]	4.82E-9		6.89E-12		3.24E-10									
Acidification potential of land and water		[kg SO <sub>2</sub> -Eq.]	4.12E+0		6.78E-3		-3.98E+0									
Eutrophication potential		[kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3</sup> -Eq.]	4.18E-1		7.99E-4		-3.41E-1									
Formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidants		[kg ethene-Eq.]	7.04E-1		4.75E-4		-5.12E-1									
Abiotic depletion potential for non-fossil resources		[kg Sb-Eq.]	1.02E-4		9.53E-7		1.70E-4									
Abiotic depletion potential for fossil resources		[MJ]	2.06E+4		2.25E+1		-1.31E+4									
RESULTS OF THE LCA - RESOURCE USE: 1 ton of cold rolled steel coil																
Parameter		Unit	A1-A3		C3		D									
Renewable primary energy as energy carrier		[MJ]	6.16E+2		1.12E+1		1.20E+3									
Renewable primary energy resources as material utilization		[MJ]	0.00E+0		0.00E+0		0.00E+0									
Total use of renewable primary energy resources		[MJ]	6.16E+2		1.12E+1		1.20E+3									
Non-renewable primary energy as energy carrier		[MJ]	2.06E+4		3.43E+1		-1.23E+4									
Non-renewable primary energy as material utilization		[MJ]	0.00E+0		0.00E+0		0.00E+0									
Total use of non-renewable primary energy resources		[MJ]	2.06E+4		3.43E+1		-1.23E+4									
Use of secondary material		[kg]	1.13E+2		0.00E+0		0.00E+0									
Use of renewable secondary fuels		[MJ]	0.00E+0		0.00E+0		0.00E+0									
Use of non-renewable secondary fuels		[MJ]	0.00E+0		0.00E+0		0.00E+0									
Use of net fresh water		[m <sup>3</sup> ]	4.59E+0		1.53E-2		5.79E-1									
RESULTS OF THE LCA - OUTPUT FLOWS AND WASTE CATEGORIES: 1 ton of cold rolled steel coil																
Parameter		Unit	A1-A3		C3		D									
Hazardous waste disposed		[kg]	1.37E-5		2.18E-7		-8.67E-6									
Non-hazardous waste disposed		[kg]	4.21E+0		2.01E+1		-2.63E+1									
Radioactive waste disposed		[kg]	-2.71E-3		4.70E-3		2.94E-1									
Components for re-use		[kg]	0.00E+0		0.00E+0		0.00E+0									
Materials for recycling		[kg]	0.00E+0		9.80E+2		0.00E+0									
Materials for energy recovery		[kg]	0.00E+0		0.00E+0		0.00E+0									
Exported electrical energy		[MJ]	0.00E+0		0.00E+0		0.00E+0									
Exported thermal energy		[MJ]	0.00E+0		0.00E+0		0.00E+0									

Para quantificar o impacto total de cada painel em relação a cada parâmetro, é necessário converter a quantidade de cada componente para os resultados apresentados, alinhando-se à unidade funcional, no caso de “GWP”, expressa em kg CO<sub>2</sub> eq. Para fins de cálculo, considerou-se a referência de 1 m<sup>2</sup> de painel, e as espessuras dos componentes, conforme a Tabela 3. Posteriormente, efetuou-se a soma de todos os componentes presentes no painel, resultando nos impactos totais associados.

### 3.2.4. Interpretação

A etapa de interpretação da análise de ciclo de vida será realizada no capítulo 4, apresentado mais à frente.

### 3.3. DESEMPENHO ACÚSTICO

No que diz respeito ao desempenho acústico dos materiais, foram realizados ensaios acústicos de isolamento a sons aéreos para obtenção do índice de redução sonora dos painéis. Adicionalmente, realizou-se a previsão do valor do isolamento sonoro, por meio do modelo de Sharp (Tadeu et al, 2010), como efeito comparativo aos resultados obtidos em ensaio.

O índice de redução sonora ponderado  $R_w$  é um parâmetro ponderado que descreve o desempenho acústico de elementos construtivos e tem a finalidade de caracterizar o isolamento sonoro de elementos de construção em edifícios, particularmente em relação ao ruído de condução aérea. O  $R_w$  avalia a eficácia de um elemento em termos de isolamento acústico, ou seja, a diferença entre os níveis de ruído medidos no interior e no exterior de um espaço, indicando se o elemento proporciona uma redução significativa do ruído transmitido através do elemento.

#### 3.3.1. Metodologia Experimental

##### 3.3.1.1. Procedimento de Ensaio

As medições foram realizadas conforme os procedimentos de medição estabelecidos na série de normas ISO 10140, que diz respeito à medição laboratorial do isolamento acústico de elementos de construção. A norma ISO 10140-1 delinea as regras de aplicação para elementos e produtos específicos, enquanto a ISO 10140-2 contém os procedimentos gerais para medições de isolamentos acústico aéreo e de impacto. Já as técnicas e procedimentos básicos de medição são detalhados na ISO 10140-4.

Os ensaios ocorreram no Laboratório de Acústica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Coimbra (DEC-UC), que dispõe de duas câmaras acústicas reverberantes adjacentes. As câmaras receptora e emissora possuem volumes de 122 m<sup>3</sup> e 111 m<sup>3</sup>, respectivamente.

As figuras a seguir exemplificam as câmaras reverberantes e zona de montagem dos provetes para o procedimento de ensaio.

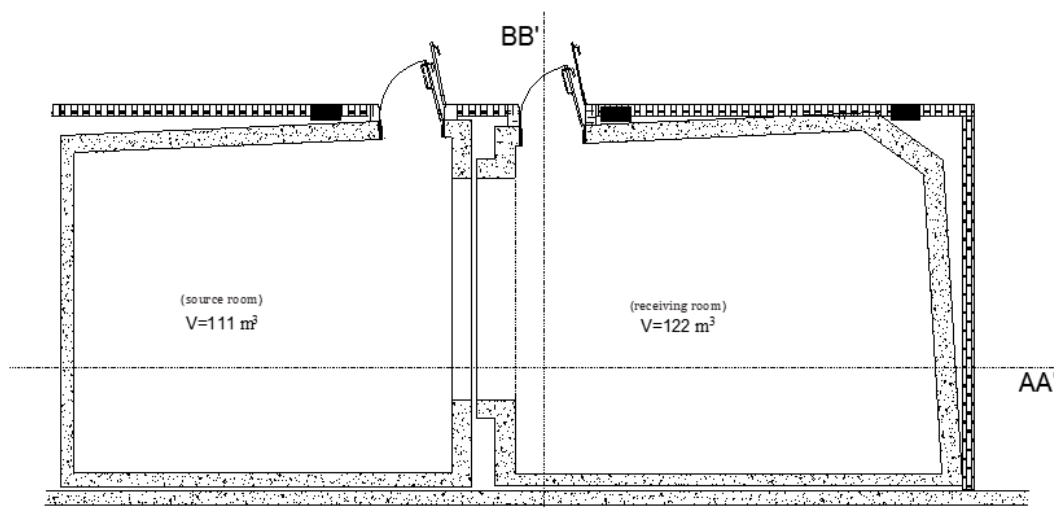


Figura 20- Vista em planta das câmaras reverberantes do DEC-UC

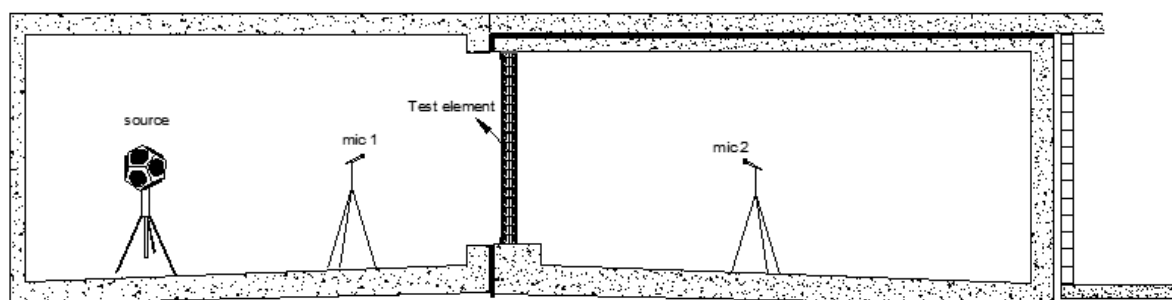


Figura 21- Vista em corte AA' das câmaras reverberantes do DEC-UC

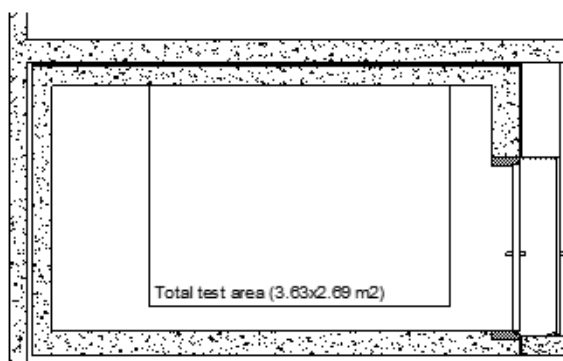


Figura 22- Vista em corte BB' das câmaras reverberantes do DEC-UC com a zona de montagem de provetes assinalado

As amostras dos painéis foram montadas na abertura entre as duas câmaras, conforme mostra a Figura 23, e possuem uma área de aproximadamente  $9,80 \text{ m}^2$  ( $3,63 \text{ m} \times 2,69 \text{ m}$ ). Para a fixação das amostras, foi instalado um perfil de aço formato L, disposto ao longo do contorno da abertura entre as câmaras.



Figura 23- Câmaras acústicas durante preparo para montagem do ensaio (vista a partir da câmara emissora)

O procedimento de medição envolveu o uso de dois microfones, cada um com seus pré-amplificadores, e um sistema de aquisição de sinais. Para a fonte de ruído, foi utilizada uma fonte omnidirecional, e um amplificador e gerador de sinais.

A seguir, indica-se a descrição dos equipamentos que foram utilizados:

- 1 microfone modelo 4155 da Bruel & Kjaer;
- 1 microfone modelo 40AF da GRAS- Sound & Vibration;
- Sistema de aquisição de sinais Symphonie da 01dB;
- Fonte omnidirecional modelo DO12 da 01dB, composta por 12 altifalantes;
- Amplificador de sinais modelo 700 da 011 dB;
- Gerador de sinais modelo RC-10 da 01 dB.

A disposição da fonte sonora e do microfone foi planejada para criar um campo sonoro o mais difuso possível, atendendo as distâncias mínimas de 2,0 m entre posição de microfone e 1,0 m entre uma posição de microfone e os limites do compartimento. Durante as medições, a fonte foi colocada em duas posições distintas, enquanto em cada uma das câmaras acústicas, foram empregadas cinco posições de microfone.

Antes do início das medições, foi efetuada a calibração dos microfones para assegurar a precisão das medições e aumentar a confiabilidade dos resultados.

Para determinar o isolamento sonoro a sons aéreos, foram realizados ensaios conforme estipulado pela norma ISO 10140-4, de modo a avaliar os níveis de pressão sonora emitidos na câmara emissora, os recebidos na câmara receptora, assim como o ruído de fundo e o tempo de reverberação para obtenção da área equivalente de absorção sonora.

Os ensaios em laboratório são geralmente cometidos em bandas de frequência de um terço de oitava, na faixa entre os 100 e os 5000 Hz. Porém, nos testes realizados a medição iniciou-se aos 50 Hz. Foram obtidos 10 resultados para os níveis de pressão sonora em cada câmara, para duas posições de fonte e cinco de microfone, como previamente mencionado.

Cada painel foi submetido a duas medições. A primeira realizada sem a aplicação de bandas de reforço de isolamento, e a segunda com a aplicação das bandas do tipo Tecsound SY35, fabricadas pela Soprema. Essas bandas consistem em uma membrana sintética insonorizante, com uma camada autoadesiva incorporada, para aplicação direta na superfície. As bandas foram aplicadas ao longo de todas as arestas de cada painel individual, para prevenir possíveis fugas sonoras nas amostras. Esse procedimento teve como propósito verificar se a utilização das bandas teria um impacto positivo no desempenho acústico final do painel.

Para o procedimento de medição do tempo de reverberação, além da série de normas ISO 10140, foi utilizada também a norma ISO 3382-2. Foi adotado o método do ruído interrompido, com a utilização de uma fonte sonora potente, a qual emite um ruído constante com elevado nível de pressão sonora, e consiste em medir o decaimento desse som após o desligamento abrupto da fonte.

A norma descreve três métodos distintos que determinam o número mínimo de pontos de medições e de medições. Como o resultado é utilizado como termo de correção para o isolamento, optou-se pelo método de engenharia. Sendo assim, foram utilizadas duas posições de fonte e três posições de microfone, com dois decaimentos para cada ponto de medição, totalizando em 12 medições.

As imagens a seguir exibem as amostras devidamente montadas para a execução dos ensaios.





Figuras 24 e 25- Painel sanduíche de revestimento (P1) - Vista de ambas as faces



Figuras 26 e 27- Painel sanduíche de revestimento (P1) com aplicação das bandas de reforço - Vista de ambas as faces



Figuras 28 e 29- Painel sanduíche para coberturas inclinadas (P2) - Vista de ambas as faces



Figuras 30 e 31- Painel sanduíche para coberturas inclinadas (P2) com aplicação das bandas de reforço - Vista de ambas as faces



Figuras 32 e 33- Sistema de revestimento duplo (P3) - Vista de ambas as faces



Figura 34- Painel sanduíche para coberturas planas (P4)



Figuras 35 e 36- Painel sanduíche para coberturas planas (P4) com aplicação das bandas de reforço - Vista de ambas as faces

### 3.3.1.2. Tratamento dos Dados

Através dos ensaios, obtém-se o índice de redução sonora (R) para cada tipo de painel ensaiado. Segundo a norma ISO 10140-2, o valor de R corrigido para cada banda de frequência é estabelecido por:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S T_r}{0.16 V}, \quad (1)$$

em que:

$L_1$  é o nível médio sonoro na câmara emissora, em dB;

$L_2$  é o nível médio sonoro na câmara receptora, em dB;

$S$  é a área do provete da divisória ensaiada, em m<sup>2</sup>;

$T_r$  é o tempo médio de reverberação para uma dada frequência, em segundos;

$V$  é o volume da sala receptora, em m<sup>3</sup>.

Os níveis sonoros médios, por bandas de terços de oitava, para as câmaras emissora e receptora, são determinados a partir da média logarítmica dos níveis medidos em todas as posições de fonte e microfone.

As medições do ruído de fundo no compartimento receptor foram realizadas para identificar possíveis perturbações exteriores ou associadas ao equipamento de medição. A correção do ruído de fundo deve ser feita nos seguintes casos:

- a) Se a diferença entre o nível sonoro medido (com e sem a fonte sonora em funcionamento) se encontre entre os 6 e os 15 dB:

$$L_{2 \text{ corrigido}} = 10 \log \left( 10^{\frac{L_2}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}} \right), \quad (2)$$

em que:

$L_{2 \text{ corrigido}}$  é o nível do sinal ajustado no compartimento receptor, em dB;

$L_2$  é o nível combinado de sinal e do ruído de fundo, em dB;

$L_b$  é o nível sonoro do ruído de fundo, em dB.

- b) Se a diferença de níveis for menor ou igual a 6 dB:

$$L_{2 \text{ corrigido}} = L_2 - 1,3 \quad (3)$$

- c) Se a diferença de níveis for superior a 15 dB não é necessário fazer a correção, ou seja:

$$L_{2 \text{ corrigido}} = L_2 \quad (4)$$

O tempo de reverberação para cada banda de frequência é obtido através do valor médio entre todas as combinações de fonte e microfone.

A quantificação do isolamento sonoro ponderado é realizada de acordo com a norma NP EN ISO 717-1. O valor único, designado por  $R_w$ , expresso em decibéis, é obtido por meio do ajuste entre a curva dos valores medidos do índice de redução sonora em função de cada banda de frequência e a curva normalizada estabelecida na norma.

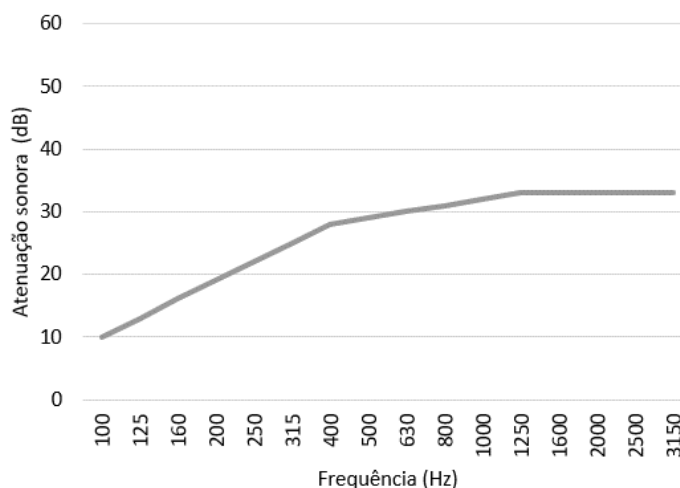


Figura 37- Curva normalizada de referência (adaptado de NP EN ISO 717-1)

O ajuste é feito em incrementos de 1 dB, em relação à curva dos valores medidos, com o objetivo de maximizar a soma dos desvios desfavoráveis sem ultrapassar 32 dB. Um desvio é considerado desfavorável quando o valor medido é inferior ao valor de referência em uma determinada banda de frequência. Após atender às condições descritas, o valor único do isolamento sonoro,  $R_w$ , é determinado pela ordenada da curva normalizada de referência na frequência de 500 Hz.

Para complementar o valor de  $R_w$ , o resultado deve estar acompanhado dos termos de adaptação espectrais,  $C$  e  $C_{tr}$ , que correspondem ao ruído rosa e ao ruído de tráfego, respectivamente. Estes termos são correções definidas pela norma NP EN ISO 717-1, em função das características espectrais do ruído de emissão. Os termos de adaptação espectral são calculados a partir da seguinte expressão:

$$C_j = X_{Aj} - X_W, \quad (5)$$

em que:

$j$  é o índice de identificação dos espectros, nº 1 ou 2;

$X_W$  é o índice de isolamento sonoro calculado de acordo com o método anteriormente descrito;

$X_{Aj}$ , em decibéis, é calculado pela expressão:

$$X_{Aj} = -10 \log \sum 10^{\frac{L_{i,j} - X_i}{10}}, \quad (6)$$

onde:

$i$  é o índice para as bandas de frequência de um terço de oitava, de 100 a 3150 Hz;

$L_{i,j}$  são os níveis de pressão sonora referidos na norma, para a banda de frequência  $i$  e espectro  $j$ ;

$X_i$  é a redução sonora  $R$  para a banda de frequência  $i$ , aproximado a uma casa decimal.

O valor calculado para  $C_j$  é arredondado para um número inteiro e é identificado de acordo com o espectro utilizado. Se calculado com o espectro nº 1, o termo de adaptação corresponde ao ruído rosa ( $C$ ); quando calculado com o espectro nº 2, corresponde ao ruído de tráfego ( $C_{tr}$ ). O resultado é exibido da seguinte forma:  $R_w(C; C_{tr})$ .

### 3.3.2. Metodologia de Previsão

Existem diversas metodologias para prever e estudar o isolamento sonoro de soluções construtivas. Neste estudo, optou-se pelo modelo de Sharp (Tadeu et al, 2010). Este modelo é aplicável a elementos simples e isotrópicos, e não apenas considera a influência da massa e a frequência do som incidente, mas também incorpora a contribuição da quebra de isolamento na frequência crítica e o fator de perdas relativo ao material que constitui o elemento.

#### 3.3.2.1. Elementos Simples

Para os elementos simples, o traçado da curva de isolamento sonoro, representado na Figura 38, é dado pelas seguintes expressões:

$$R = \begin{cases} 20 \log(fm) - 47dB & f \leq 0,5 f_c \\ 20 \log(f_c m) - 53 + [26,58 + 33,22 \log(\eta)] \log\left(\frac{2f}{f_c}\right) & 0,5 f_c \leq f \leq f_c \\ 20 \log(fm) - 44,4 + 10 \log\left(\frac{\eta f}{f_c}\right) & f_c \leq f \leq f(C), \text{ com } f(C) = 0,443 \left(\frac{f_c}{\eta}\right) \\ 20 \log(fm) - 47dB & f > f(C), \end{cases} \quad (7)$$

onde:

$m$  é a massa superficial, em  $\text{kg/m}^2$ ;

$\eta$  é o fator de perdas;

$f_c$  é a frequência crítica, em Hz, dada pela expressão:

$$f_c = \frac{c^2}{1,8138 h} \sqrt{\frac{\rho (1 - \nu^2)}{E}}, \quad (8)$$

em que:

$c$  é a velocidade de propagação do som, em m/s;

$h$  é a espessura do elemento, em m;

$\rho$  é a densidade do material do elemento, em  $\text{kg/m}^3$ ;

$\nu$  é o coeficiente de Poisson do material;

$E$  é o módulo de Young, em  $\text{N/m}^2$ .

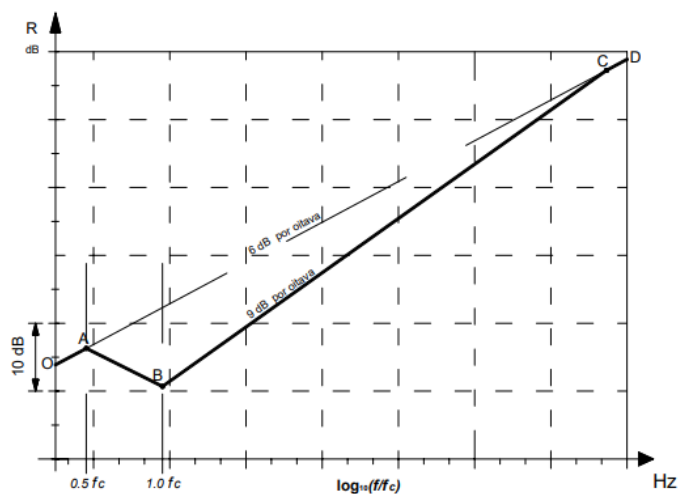


Figura 38- Ilustração da curva de isolamento sonoro para elemento simples, através do modelo de Sharp (Tadeu et al, 2010)

### 3.3.2.2. Elementos Duplos

O modelo de Sharp pode ser aplicado a elementos duplos de parede. No entanto, nesse caso, o traçado da curva de isolamento sonoro (Figura 39) é determinado pelas seguintes equações:

- Para o ponto A:

$$R_A = 20 \log(m_1 + m_2) + 20 \log(f_0) - 47 \quad (9)$$

- Para o ponto B:

$$R_B = \begin{cases} R_A + 20 \log \left( \frac{f_{c1}}{f_0} \right) - 6 & (a) \\ 20 \log (m1) + 10 \log (b) + 30 \log (f_{c2}) + 20 \log \left( 1 + \frac{m2 \sqrt{f_{c1}}}{m1 \sqrt{f_{c2}}} \right) - 78 & (b) \\ 20 \log (m1e) + 40 \log (f_{c2}) - 99 & (c) \\ 20 \log (m1e) + 40 \log (f_{c2}) + 20 \log \left( 1 + \frac{m2 f_{c1}}{m1 f_{c2}} \right) - 105 & (d) \end{cases} \quad (10)$$

em que:

(a) Quando não existe material absorvente na caixa de ar;

(b) Separação entre painéis através de uma grelha de apoios, com o menor espaçamento igual a b, em m;

(c) Separação entre painéis através de uma linha de apoios, espaçados da distância e, em m;

(d) Separação entre painéis através de apoios pontuais, com menor afastamento entre eles igual a e, em m.

As expressões (b), (c) e (d) são válidas apenas na presença de absorção sonora na caixa de ar. Se houver apenas apoio no contorno, um acréscimo de 4 dB é adicionado a  $R_B$ .

- Para o ponto C:

$$R_C = \begin{cases} R_B + 6 + 10 \log (\eta_2) & f_{c1} < f_{c2} \\ R_B + 6 + 10 \log (\eta_2) + 5 \log (\eta_1) & f_{c1} = f_{c2} \end{cases} \quad (11)$$

- Para o ponto D:

$$R_D = R_A + 60 \log \left( \frac{f_L}{d} \right), \quad \text{com } f_L = \frac{55}{d}, \quad (12)$$

onde:

$m1$  e  $m2$  são as massas superficiais dos elementos 1 e 2 da parede dupla, em  $\text{kg/m}^2$ ;

$f_{c1}$  e  $f_{c2}$  são as frequências críticas dos elementos 1 e 2, em Hz, obtidas através da expressão (8);

$\eta_1$  e  $\eta_2$  são os fatores de perdas dos elementos 1 e 2;

$f_0$  é a frequência de ressonância do conjunto das duas massas e da caixa de ar, em Hz, dada pela expressão:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1}{d} \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)}, \quad (13)$$

em que:

$d$  é a espessura do total elemento duplo, em m.

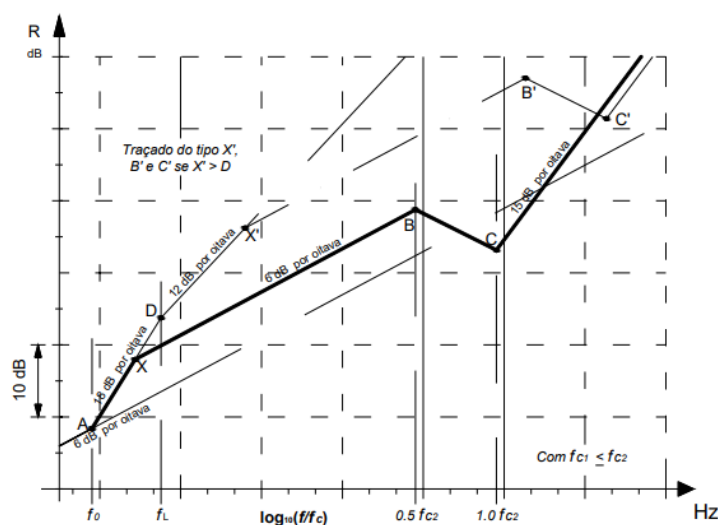


Figura 39- Ilustração da curva de isolamento sonoro para elemento duplo, através do modelo de Sharp (Tadeu et al, 2010)

Para elaborar a curva, inicialmente, é necessário identificar o ponto A. Para frequências abaixo de  $f_0$ , é aplicado um desconto de 2 dB por terço de oitava. Em seguida, marca-se o ponto X e traça-se uma linha de X até A. Posteriormente, identifica-se o ponto B e traça-se uma linha de X até B. Por fim, se o ponto C estiver dentro da faixa de frequências desejada, marca-se C e conecta-se B a C com uma linha.

Assim como na metodologia experimental, o valor do índice do isolamento sonoro ponderado ( $R_w$ ) é obtido após a comparação e ajuste entre a curva traçada pelo modelo de Sharp e a curva normalizada (Figura 37). O mesmo procedimento é aplicado para os termos de adaptação espectral.



## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

A análise do ciclo de vida dos painéis fornece perspectivas sobre as emissões de carbono relacionadas à etapa de fabricação. Esses resultados serão comparados com soluções comerciais de características semelhantes. Além disso, essas mesmas soluções comerciais serão utilizadas como objeto de comparação também para o desempenho acústico. Essa abordagem permite uma análise abrangente do comportamento ambiental e acústico dos painéis em comparação com soluções já existentes no mercado.

### 4.1. DESEMPENHO AMBIENTAL

Esta seção aborda a avaliação do desempenho ambiental dos painéis, a interpretação de resultados, e estes podem variar consideravelmente, dependendo de diversos fatores, como as matérias-primas empregadas, os métodos de produção adotados, as condições locais e os padrões de consumo.

Para a avaliação dos impactos, foram consideradas todas as etapas do ciclo de vida, de forma a identificar em qual delas ocorre a maior emissão de carbono, para o parâmetro “Aquecimento Global (GWP)”.

A expressão dos resultados dessa análise pode ser realizada em termos de pegada de carbono total, representando a quantidade global de emissões de gases de efeito estufa relacionadas ao ciclo de vida dos painéis sanduíche, medida em unidades de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> eq.).

Da Figura 40 à Figura 43, apresentam-se os resultados alcançados para os quatro tipos de painéis. Cada gráfico oferece uma representação clara e distintiva das emissões de carbono em cada etapa, e proporciona uma análise detalhada e elucidativa sobre o desempenho ambiental para o parâmetro de aquecimento global.

Parâmetro	Unidade	Etapa de produto	Etapa de processo de construção		Etapa de fim de vida		Benefícios e cargas para além da fronteira do sistema
		A1-A3	A4	A5	C2	C3	D
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -Eq.	-16,84	1,09	1,56	0,08	48,32	-53,64

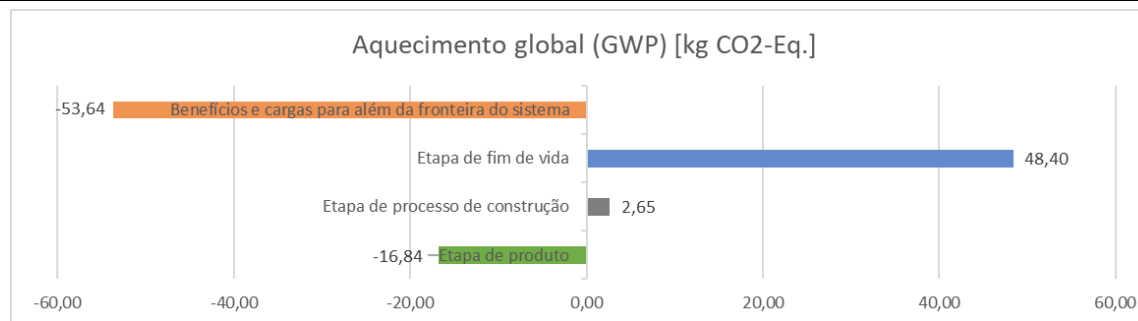


Figura 40- Resultados da ACV do painel P1

Parâmetro	Unidade	Etapa de produto	Etapa de processo de construção		Etapa de fim de vida			Benefícios e cargas para além da fronteira do sistema
		A1-A3	A4	A5	C2	C3	C4	D
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -Eq.	-15,07	1,66	1,92	0,09	48,32	0,03	-53,77

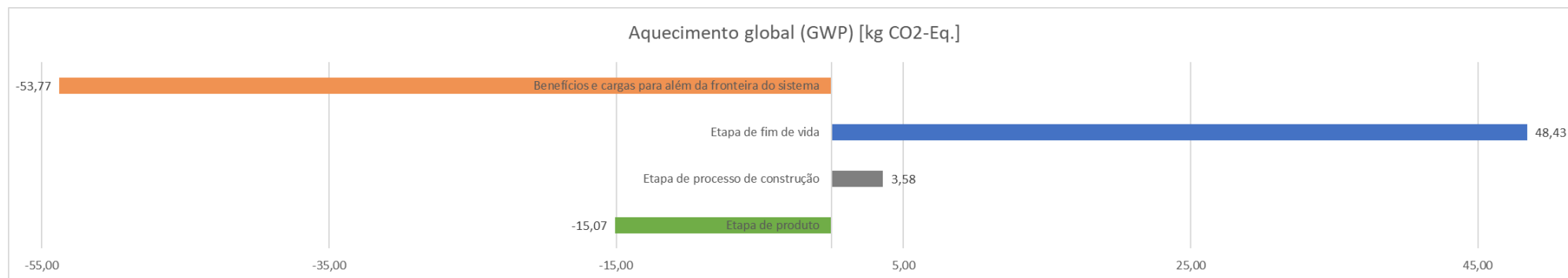


Figura 41- Resultados da ACV do painel P2

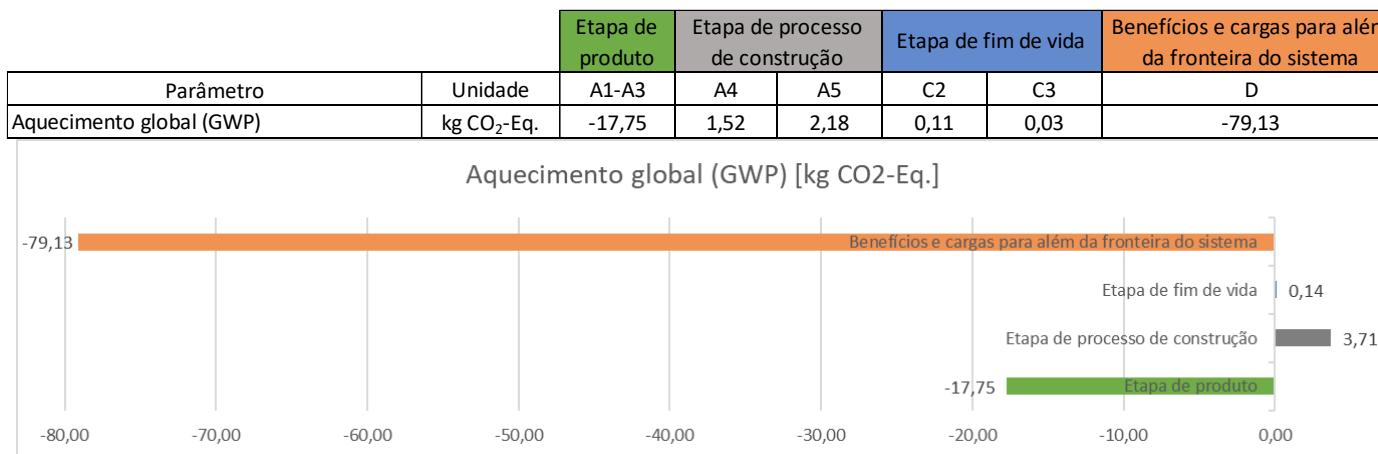


Figura 42- Resultados da ACV do painel P3

Parâmetro	Unidade	Etapa de produto	Etapa de processo de construção		Etapa de fim de vida			Benefícios e cargas para além da fronteira do sistema
		A1-A3	A4	A5	C2	C3	C4	D
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -Eq.	-28,28	2,02	2,44	0,11	64,42	0,03	-66,38

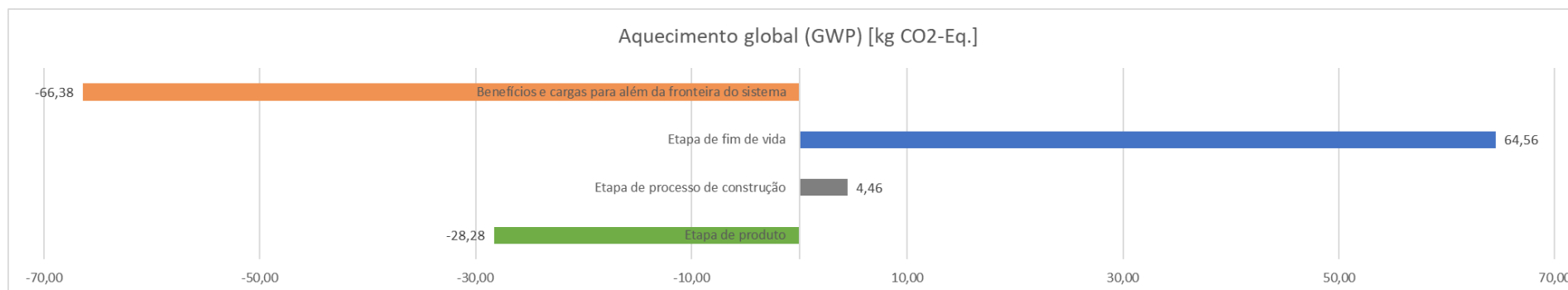


Figura 43- Resultados da ACV do painel P4

A madeira, por ser um biomaterial, possui a capacidade de armazenar carbono biogênico, também conhecido como carbono biológico, durante o processo de fotossíntese. Esse carbono biogênico, que é sequestrado pela madeira enquanto a árvore cresce na floresta, é considerado neutro, uma vez que representa um sequestro temporário de carbono.

Durante as etapas de produção (A1-A3), são registrados resultados negativos devido ao armazenamento deste carbono biogênico. No entanto, na fase de fim-de-vida (módulos C), ocorre a liberação deste carbono armazenado, resultando novamente em emissões de CO<sub>2</sub>. O módulo D apresenta-se também negativo, pois está relacionado à recuperação de energia proveniente da incineração do material, o que é considerado um benefício ambiental. As emissões de carbono associadas ao ciclo de vida da madeira são complexas, pois abrangem tanto o sequestro quanto a liberação de carbono em diferentes etapas do processo (Caldas, 2021).

Foram levadas em consideração todas as fases do ciclo de vida para os cálculos realizados. No entanto, ao avaliar a emissão de carbono durante a produção dos painéis, concentrou-se exclusivamente na etapa do produto, abrangendo o módulo A1-A3.

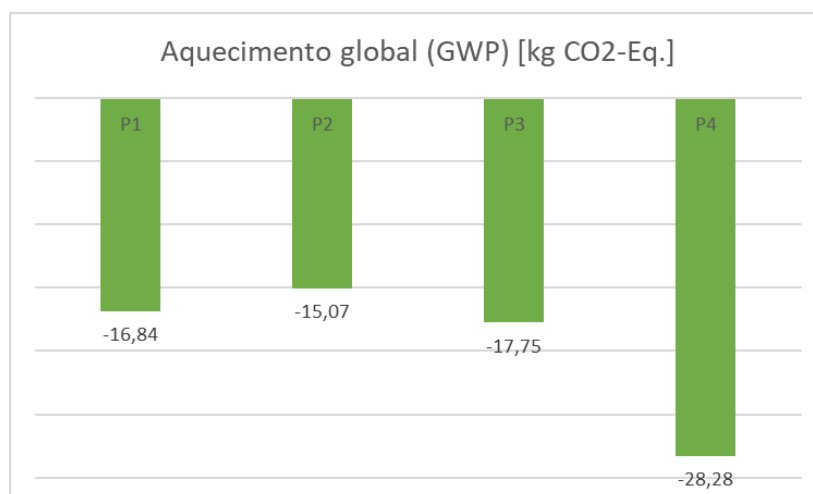


Figura 44- Resultados para os quatro painéis durante a etapa de produto

Os resultados, expostos na Figura 44, indicam que o painel P4 possui uma maior quantidade de carbono biogênico armazenado devido à sua espessura mais elevada de fibra de madeira. Em contrapartida, os painéis P1, P2 e P3 apresentam quantidades de emissões semelhantes. Embora o painel P3 também incorpore lã mineral em sua composição, o uso de uma espessura maior de fibras de madeira acaba por compensar as emissões finais de carbono.

## 4.2. DESEMPENHO ACÚSTICO

### 4.2.1. Resultados dos Ensaio Laboratoriais

De seguida, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados em cada tipo de painel (P1 a P4), tanto na configuração com bandas de reforço acústico quanto na configuração sem essas bandas autoadesivas. No caso do sistema de revestimento duplo, não houve necessidade de utilizar as bandas de reforço acústico.

#### 4.2.1.1. Painel Sanduíche de Revestimento- P1

Para o painel sanduíche de revestimento foi obtido um índice global de redução sonora ponderado ( $R_w$ ) de 29 dB, sem a utilização das bandas de reforço acústico (Figura 45). Com a incorporação dessas bandas, o valor do índice  $R_w$  aumentou para 30 dB (Figura 46), representando uma melhoria pouco significativa no isolamento acústico a sons aéreos.

Frequência (Hz)	R (dB)
50	17,8
63	12,2
80	22,2
100	19,1
125	21,3
160	16,4
200	19,7
250	21,1
315	23,9
400	26,3
500	27,9
630	27,6
800	28,7
1000	28,9
1250	27,2
1600	25,7
2000	29,7
2500	35,6
3150	37,4
4000	40,4
5000	44,6
$R_w(C; C_{tr}) = 29(-1; -3) \text{ dB}$	

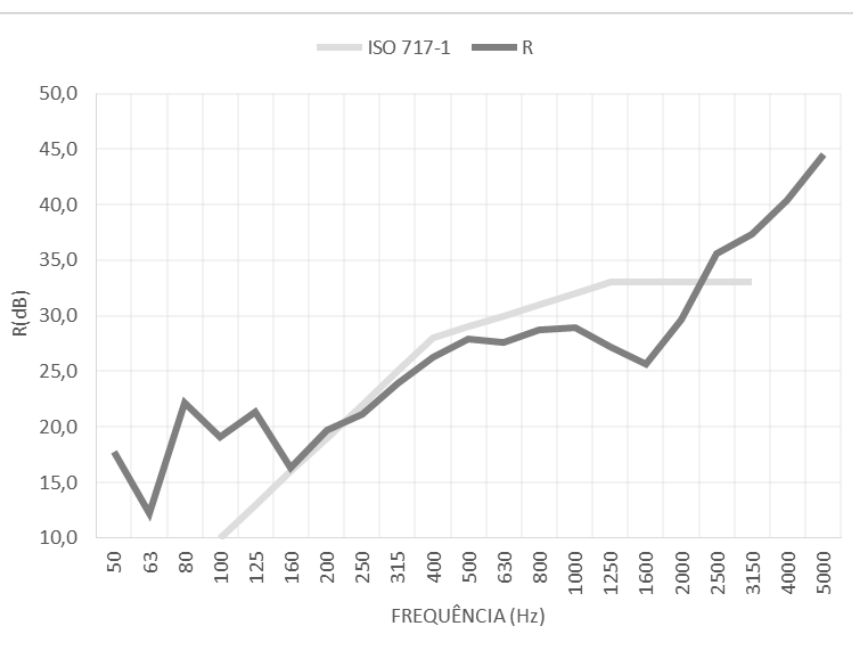


Figura 45- Resultados da redução sonora do painel sanduíche de revestimento P1, sem bandas de reforço acústico

Frequência (Hz)	R (dB)
50	20,8
63	12,4
80	22,3
100	19,3
125	22,2
160	17,5
200	20,8
250	22,3
315	24,3
400	26,2
500	28,9
630	28,6
800	29,2
1000	29,7
1250	27,7
1600	26,0
2000	30,0
2500	35,8
3150	38,0
4000	40,6
5000	44,8

$R_w(C; C_{tr}) = 30(-2; -3)$ dB
----------------------------------

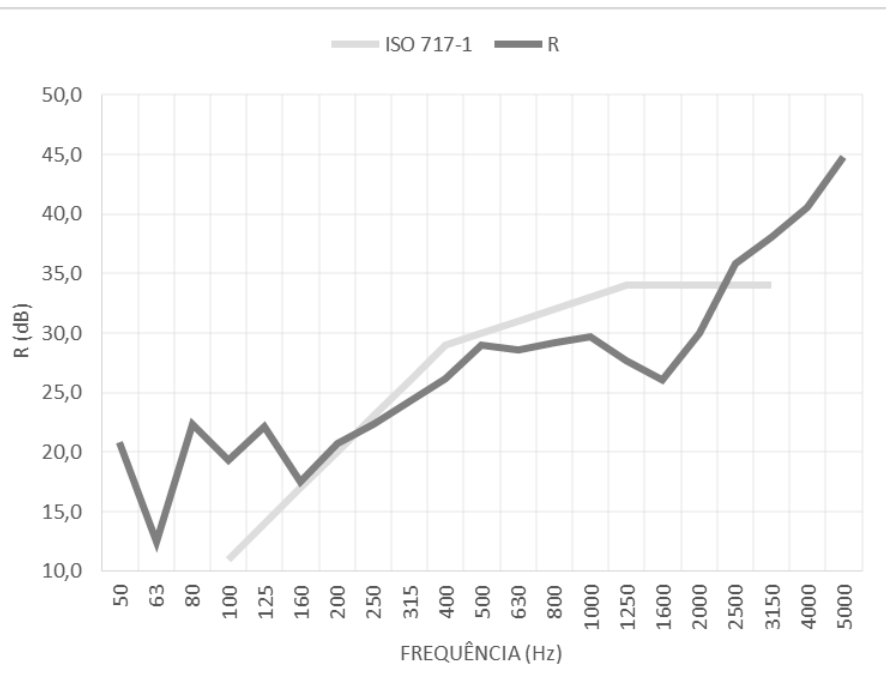


Figura 46- Resultados da redução sonora do painel sanduíche de revestimento P1, com bandas de reforço acústico

#### 4.2.1.2. Painel Sanduíche para Coberturas Inclinadas- P2

O índice global de redução sonora ponderado ( $R_w$ ) obtido para o painel sanduíche para coberturas inclinadas foi de 30 dB, tanto com quanto sem a utilização das bandas de reforço (Figura 47 e Figura 48), portanto, não houve nenhuma melhoria sensível no desempenho acústico com este elemento autoadesivo.

Frequência (Hz)	R (dB)
50	17,1
63	10,9
80	21,1
100	17,7
125	21,2
160	18,4
200	21,0
250	21,3
315	23,4
400	25,3
500	27,3
630	27,7
800	29,1
1000	29,4
1250	27,8
1600	29,1
2000	34,6
2500	38,7
3150	40,3
4000	43,5
5000	47,0

$R_w(C; C_{tr}) = 30(-1; -3)$  dB

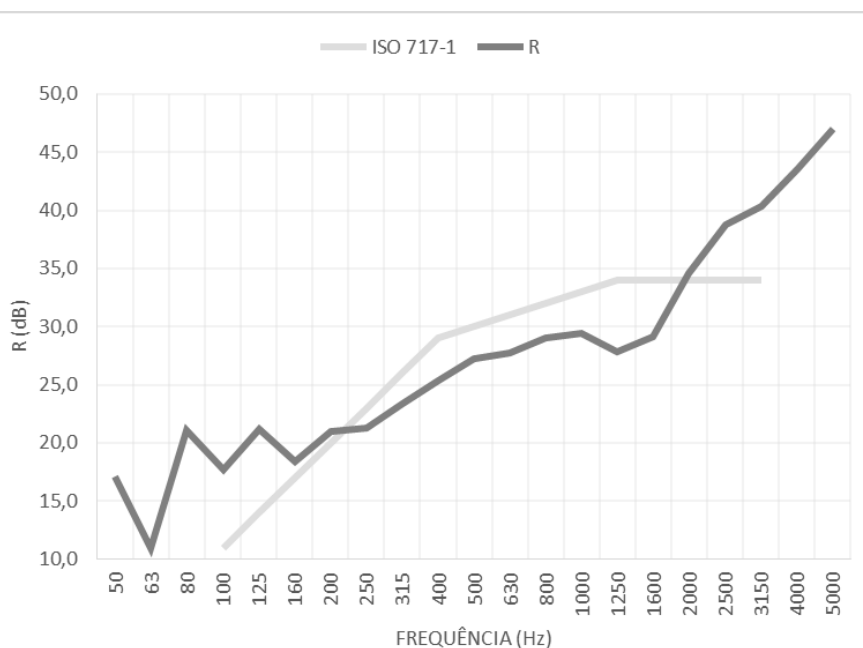


Figura 47- Resultados da redução sonora do painel sanduíche para coberturas inclinadas P2, sem bandas de reforço acústico

Frequência (Hz)	R (dB)
50	18,3
63	11,1
80	21,2
100	18,3
125	22,0
160	18,6
200	21,5
250	22,2
315	23,5
400	25,7
500	28,0
630	28,6
800	29,9
1000	30,3
1250	28,2
1600	29,6
2000	35,3
2500	39,2
3150	40,7
4000	43,9
5000	47,1

$R_w(C; C_{tr}) = 30(-1; -3)$  dB

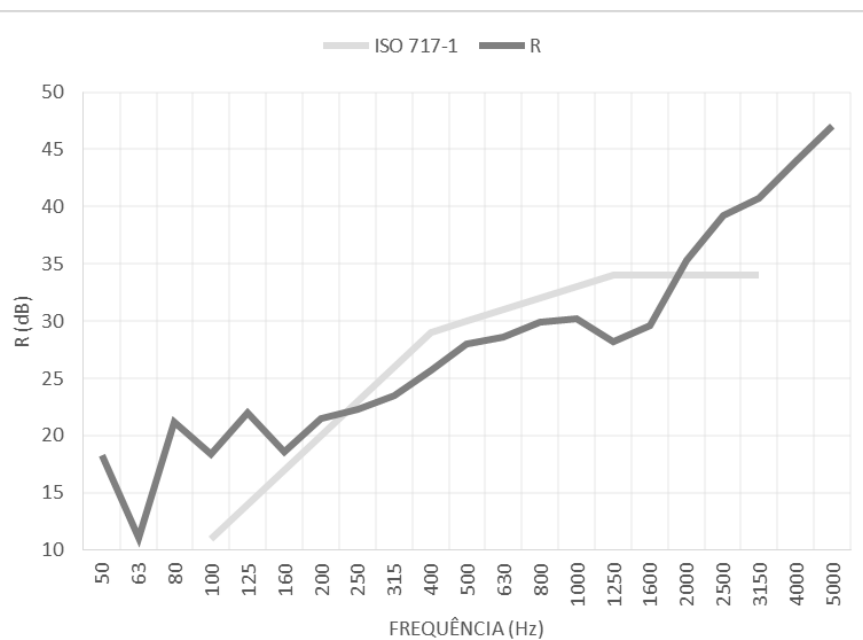


Figura 48- Resultados da redução sonora do painel sanduíche para coberturas inclinadas P2, com bandas de reforço acústico

### 4.2.1.3. Sistema de Revestimento Duplo- P3

No caso do sistema de revestimento duplo, o índice global de redução sonora ponderado ( $R_w$ ) obtido foi de 49 dB, para ambos os perfis de revestimento, tanto com nervura de 25 mm quanto para o de 40 mm (Figura 49 e Figura 50).

Frequência (Hz)	R (dB)
50	18,9
63	13,7
80	20,6
100	23,4
125	28,5
160	30,6
200	34,2
250	37,1
315	43,4
400	48,3
500	51,8
630	53,7
800	56,0
1000	56,5
1250	59,9
1600	62,1
2000	61,6
2500	62,7
3150	66,0
4000	66,3
5000	65,6
$R_w(C; C_{tr}) = 49(-2; -9) \text{ dB}$	

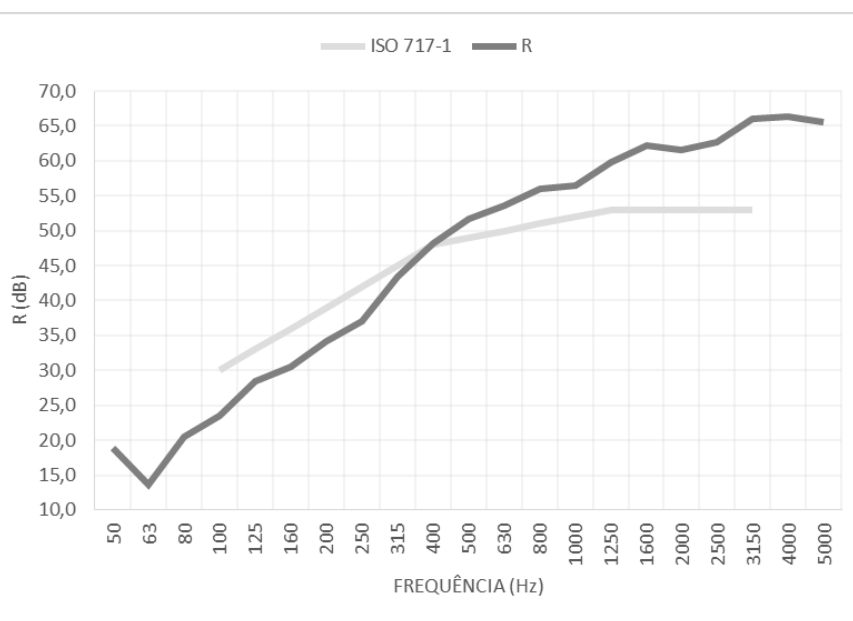


Figura 49- Resultados da redução sonora do sistema de revestimento duplo P3 com nervura de 25 mm



Frequência (Hz)	R (dB)
50	23,0
63	13,8
80	20,7
100	23,8
125	28,8
160	30,7
200	32,2
250	37,0
315	42,4
400	49,0
500	51,1
630	52,5
800	54,6
1000	55,6
1250	56,3
1600	59,3
2000	62,5
2500	61,5
3150	59,6
4000	57,7
5000	62,3

$R_w(C; C_{tr}) = 49(-3; -9)$ dB
----------------------------------

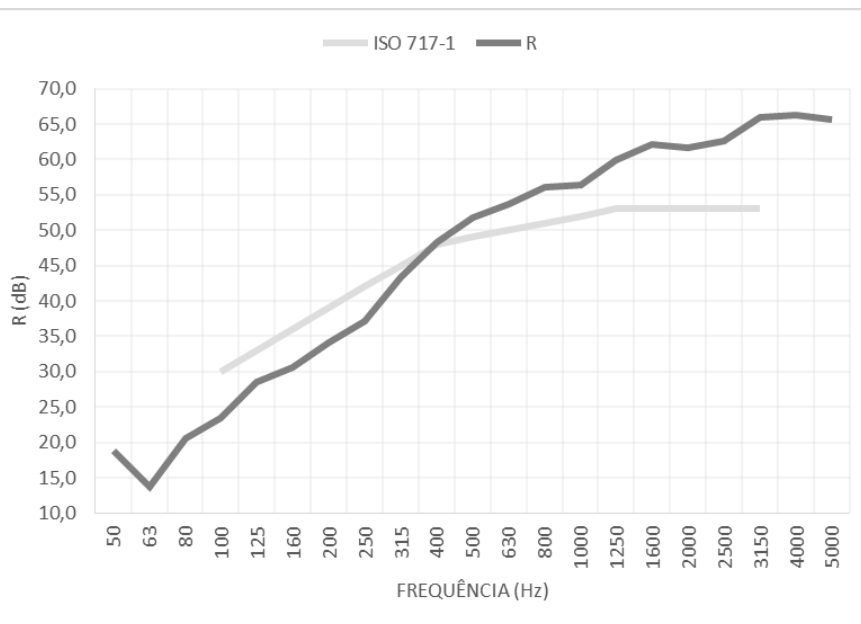


Figura 50- Resultados da redução sonora do sistema de revestimento duplo P3 com nervura de 40 mm

#### 4.2.1.4. Painel Sanduíche para Coberturas Planas- P4

O índice global de redução sonora ponderado ( $R_w$ ) obtido foi de 33 dB, tanto com quanto sem a utilização das bandas de reforço (Figura 51 e Figura 52), portanto, não houve nenhuma melhoria sensível no desempenho acústico.

Frequência (Hz)	R (dB)
50	23,1
63	16,4
80	22,7
100	24,5
125	24,2
160	19,6
200	18,8
250	20,6
315	26,1
400	26,8
500	26,0
630	32,4
800	33,3
1000	37,3
1250	40,8
1600	43,6
2000	46,5
2500	50,8
3150	53,9
4000	52,9
5000	53,1

$R_w(C; C_{tr}) = 33(-1; -4)$  dB

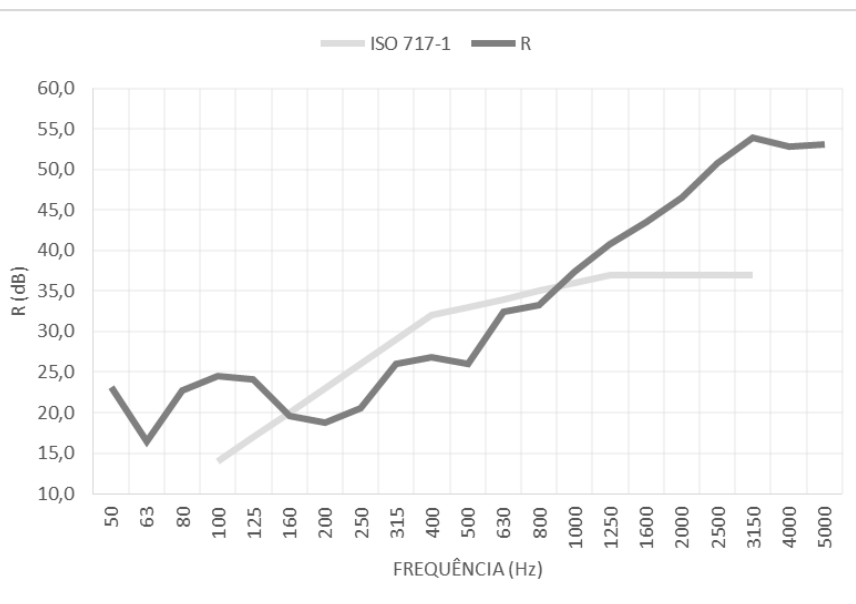


Figura 51- Resultados da redução sonora do painel sanduíche para coberturas planas P4, sem bandas de reforço acústico

Frequência (Hz)	R (dB)
50	23,7
63	15,0
80	23,5
100	25,1
125	24,8
160	20,0
200	19,1
250	20,6
315	26,4
400	27,0
500	26,2
630	32,6
800	33,4
1000	37,4
1250	40,8
1600	43,8
2000	46,5
2500	50,9
3150	54,2
4000	53,1
5000	53,3

$R_w(C; C_{tr}) = 33(-1; -4)$  dB

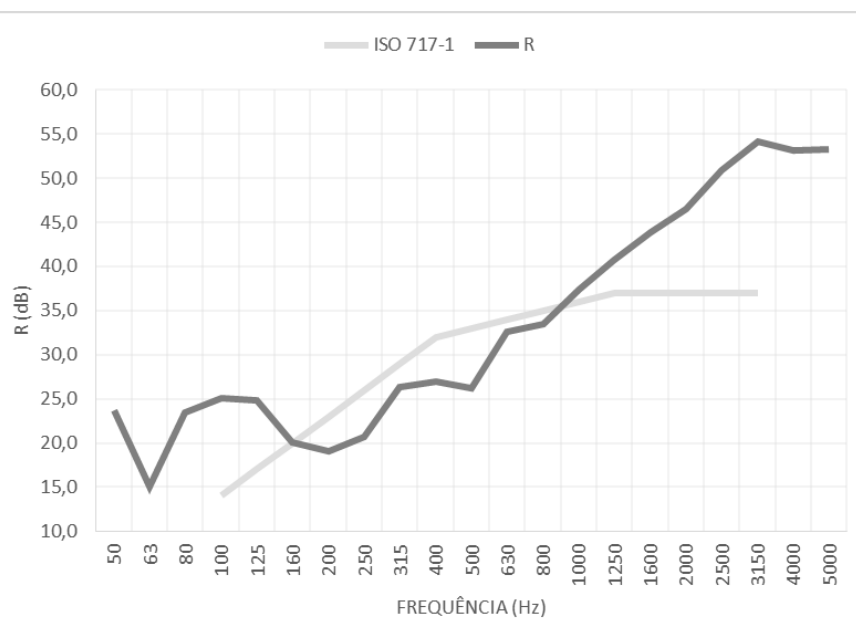


Figura 52- Resultados da redução sonora do painel sanduíche para coberturas planas P4, com bandas de reforço acústico

## 4.2.2. Resultados das Previsões pelo Método de Sharp

### 4.2.2.1. Elementos Simples

Todos os painéis sanduíche testados exibem comportamento como elementos simples. Para a previsão, foram considerados dois tipos de painéis, com diferentes espessuras. No primeiro caso, optou-se por um painel sanduíche de 150 mm, com massa aproximada de 25,5 kg/m<sup>2</sup> e densidade equivalente de 170 kg/m<sup>3</sup>, o que resultou em um índice global de redução sonora ponderado ( $R_w$ ) de 33 dB (Figura 53). Os parâmetros que foram utilizados na modelação encontram-se na Tabela 6, a seguir apresentada.

Tabela 6- Parâmetros para elementos simples-150 mm (P1 e P2)

<b>c=</b>	340	m/s
<b>E=</b>	1,38E+07	N/m <sup>2</sup>
<b>v=</b>	0,1	
<b>ρ=</b>	170,0	kg/m <sup>3</sup>
<b>h=</b>	0,15	m
<b>m=</b>	25,5	kg/m <sup>2</sup>
<b>η=</b>	0,01	

Frequência (Hz)	R (dB)
50	15,11
63	17,12
80	19,19
100	21,13
125	23,07
160	25,21
200	27,15
250	29,09
315	31,10
400	33,17
500	35,11
630	37,12
800	37,25
1000	33,39
1250	29,53
1600	28,14
2000	31,05
2500	33,96
3150	36,97
4000	40,08
5000	42,99
$R_w(C; C_{tr}) = 33(-2; -3) \text{ dB}$	

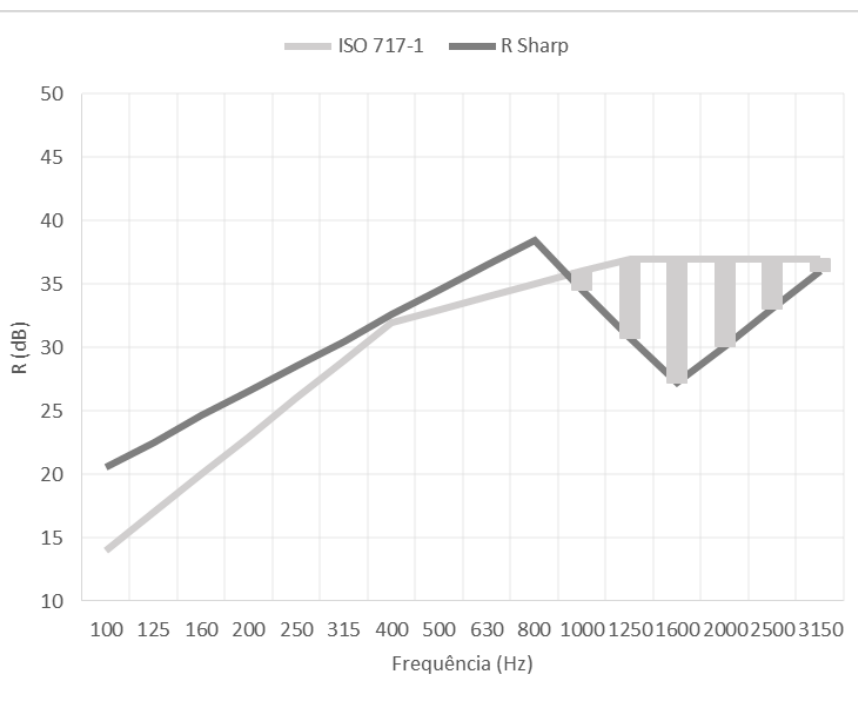


Figura 53- Resultados da previsão para elementos simples- 150 mm

O procedimento análogo foi aplicado ao segundo caso, entretanto, desta vez, foi considerado um painel de 200 mm, com massa próxima de  $34 \text{ kg/m}^2$  e densidade equivalente de  $170,0 \text{ kg/m}^3$ , que resultou em um  $R_w$  de 34 dB (Figura 54). Os parâmetros que foram empregados na modelação encontram-se na Tabela 7, abaixo apresentada.

Tabela 7- Parâmetros para elementos simples-200 mm (P4)

<b>c=</b>	340	m/s
<b>E=</b>	1,38E+07	N/m <sup>2</sup>
<b>v=</b>	0,1	
<b>ρ=</b>	170,0	kg/m <sup>3</sup>
<b>h=</b>	0,20	m
<b>m=</b>	34,0	kg/m <sup>2</sup>
<b>η=</b>	0,01	

Frequência (Hz)	R (dB)
50	17,61
63	19,62
80	21,69
100	23,63
125	25,57
160	27,71
200	29,65
250	31,59
315	33,60
400	35,67
500	37,61
630	36,41
800	32,27
1000	28,41
1250	28,67
1600	31,89
2000	34,80
2500	37,70
3150	40,71
4000	43,83
5000	46,73
<b>R<sub>w</sub>(C; C<sub>ir</sub>) = 34(-2; -3) dB</b>	

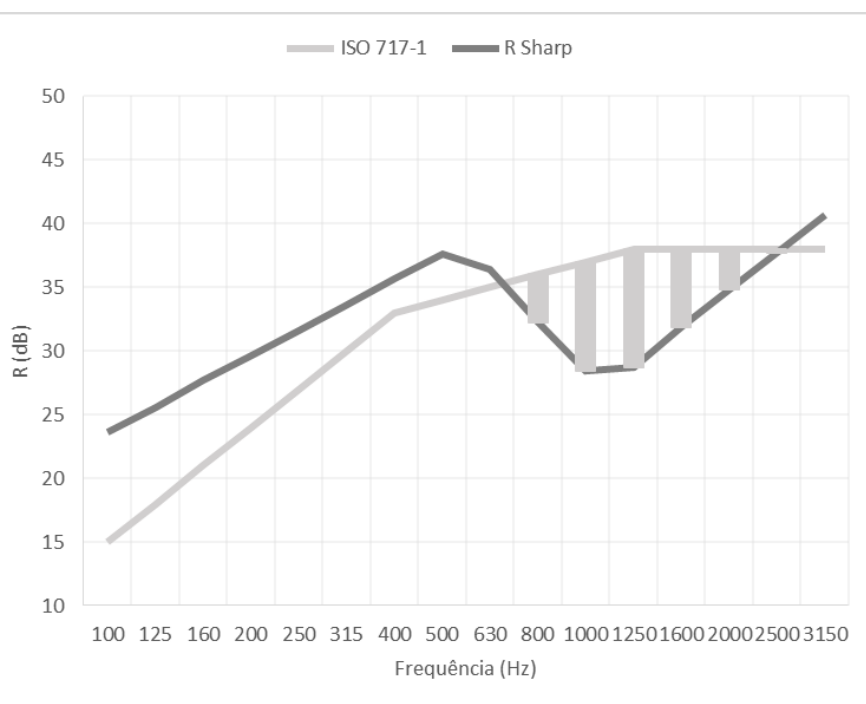


Figura 54- Resultados da previsão para elementos simples- 200 mm

#### 4.2.2.2. Elementos Duplos

Apenas o sistema de revestimento, designado por P3, se comporta como um elemento duplo. Na modelação, dada a dificuldade de prever a variação dos resultados para as diferentes nervuras, optou-se por considerar apenas um tipo de revestimento. O modelo incorporou um painel de 210 mm, com 90 mm + 120 mm descolados, revestido por chapas de 0,75 mm em

ambos os lados e uma densidade de  $7850 \text{ kg/m}^3$ , resultando em um índice global de redução sonora ponderado ( $R_w$ ) de 50 dB (Figura 55). A espessura da chapa de aço foi aumentada em 50%, de 0,50 mm para 0,75 mm, para compensar a presença do material absorvente. Os parâmetros utilizados para os elementos do sistema estão detalhados na Tabela 8.

Tabela 8- Parâmetros para elementos duplos (P3)

Elemento 1			Elemento 2		
c=	340	m/s	c=	340	m/s
E=	2,10E+11	N/m <sup>2</sup>	E=	2,10E+11	N/m <sup>2</sup>
v=	0,3		v=	0,3	
ρ=	7850	kg/m <sup>3</sup>	ρ=	7850	kg/m <sup>3</sup>
h=	0,00075	m	h=	0,00075	m
m <sub>1</sub> =	5,9	kg/m <sup>2</sup>	m <sub>2</sub> =	5,9	kg/m <sup>2</sup>
η=	0,01		η=	0,01	
d=	0,21	m			
e=	1,5	m			

Frequência (Hz)	R (dB)
50	8,32
63	10,32
80	13,57
100	19,54
125	24,77
160	30,75
200	36,73
250	42,71
315	46,42
400	49,37
500	52,32
630	55,27
800	58,22
1000	61,17
1250	64,12
1600	67,07
2000	70,02
2500	72,97
3150	75,92
4000	78,87
5000	81,83
<b>R<sub>w</sub>(C; C<sub>tr</sub>) = 50(-4; -12) dB</b>	

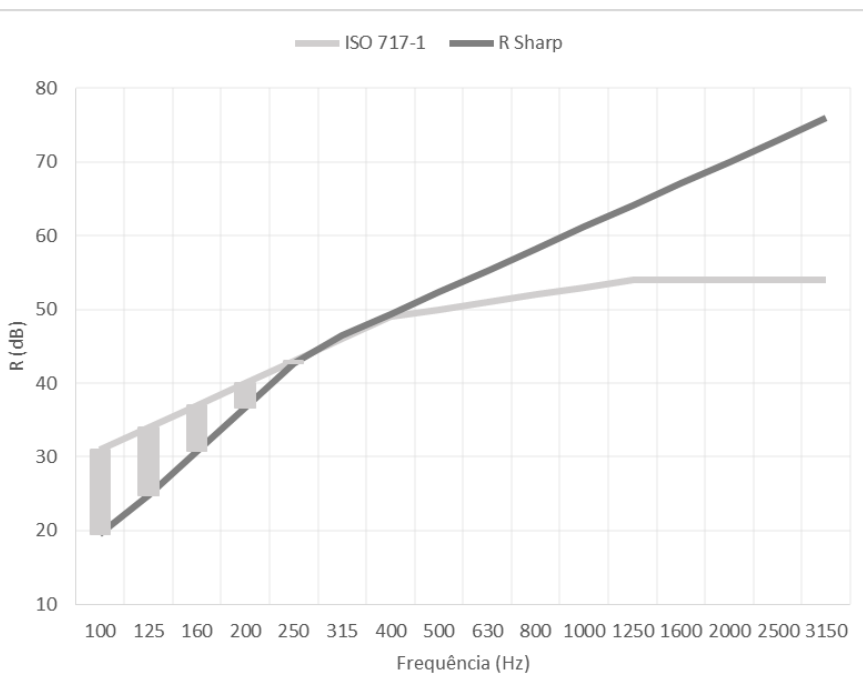


Figura 55- Resultados da previsão para elementos duplos

### **4.2.3. Comparação dos painéis em estudo com a metodologia de previsão e com soluções já existentes no mercado**

Conforme observado nos gráficos anteriores, referentes aos resultados experimentais acústicos, apresentados no item 4.2.1, é notável que, nas bandas de 1/3 de oitava em 50 e 63 Hz, os resultados são significativamente influenciados pelos modos de vibração naturais das câmaras acústicas. Entretanto, os resultados a serem divulgados em qualquer ficha técnica deverão corresponder à faixa entre os 100 e 5000 Hz, conforme consta na norma ISO 10140.

Para uma compreensão mais aprofundada do desempenho acústico dos painéis estudados, são apresentadas a curva de redução sonora obtida por meio das medições realizadas nas câmaras acústicas. Além disso, cada painel é comparado com o resultado do modelo de previsão correspondente. No mesmo gráfico, é incluída a curva de isolamento da solução comercial.

As soluções comerciais selecionadas pertencem à marca Ruukki, que disponibiliza um documento contendo as curvas obtidas nos testes de isolamento para diversos painéis listados em seu catálogo. Procurou-se selecionar opções similares em termos de composição, apesar de os painéis da marca utilizarem lã mineral como material isolante. Além dos dados acústicos, são disponibilizadas informações sobre as emissões de carbono durante o processo de fabricação dos painéis.

#### **4.2.3.1. Painel Sanduíche de Revestimento - P1**

A solução comercial escolhida para comparação é o painel sanduíche SPA 150E, projetado para uso em paredes exteriores. Esse painel apresenta um recheio composto por lã mineral e possui uma espessura total de 150 mm.

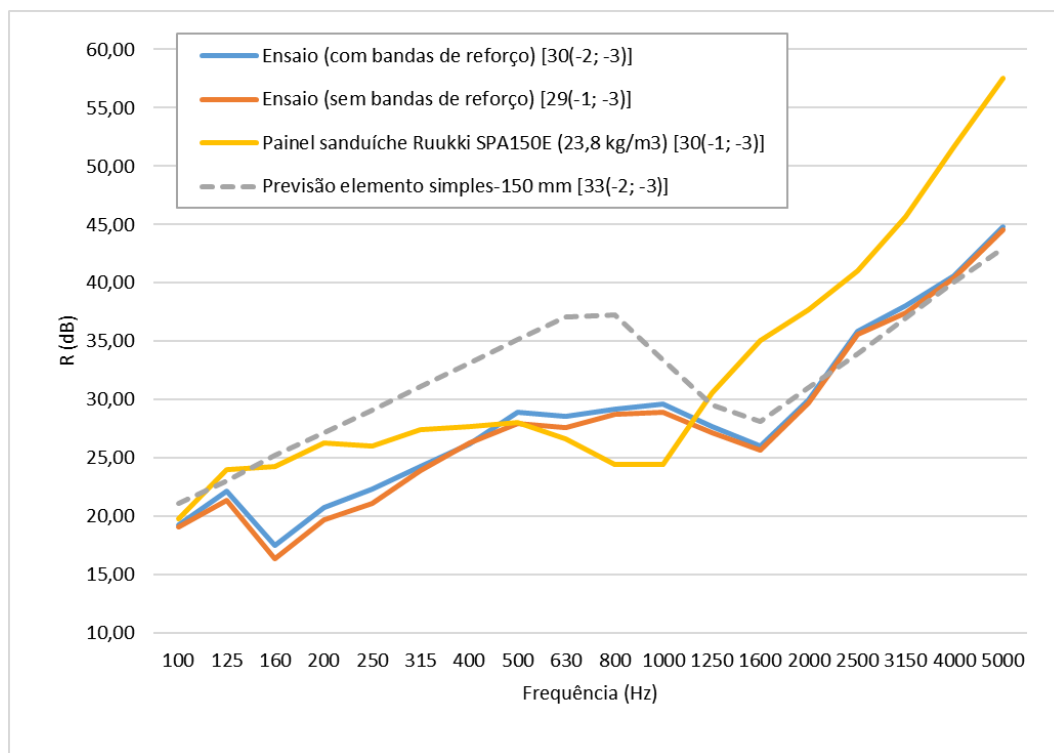


Figura 56- Comparação da redução sonora entre o painel P1, solução comercial e previsão pelo modelo de Sharp

Percebe-se que os resultados do índice de redução sonora dos painéis ensaiados são consistentes, mostrando semelhanças notáveis com o modelo comercial da Ruukki. Embora os painéis ensaiados e a solução comercial demonstrem resultados ligeiramente inferiores em comparação com a previsão gerada pelo modelo de Sharp, essa discrepância já era esperada, considerando a complexidade e variações inerentes aos ambientes reais de aplicação.

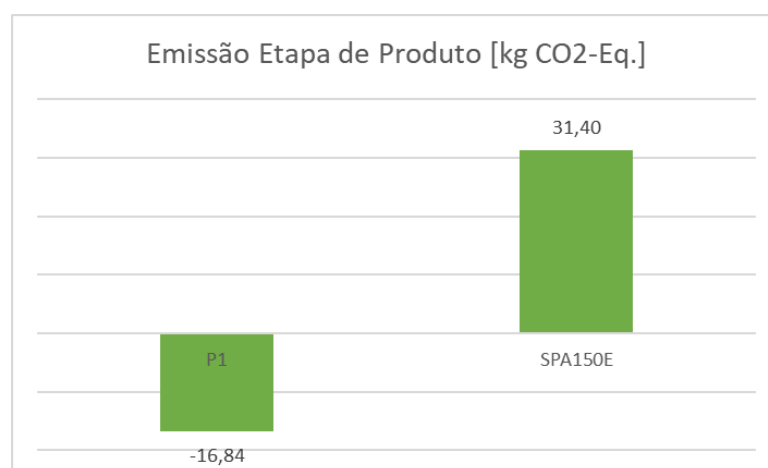


Figura 57- Comparação entre emissão de carbono de P1 e solução comercial

Em termos de desempenho ambiental, o painel ensaiado P1, devido à presença de fibra de madeira em sua composição, apresenta emissões negativas de carbono, devido ao

armazenamento de carbono biogênico. Entretanto, a solução comercial da Ruukki, o painel SPA150E, apresenta uma emissão de carbono mais elevada, uma vez que não inclui materiais à base de madeira em sua composição.

#### 4.2.3.2. Painel Sanduíche para Coberturas Inclinadas- P2

A solução comercial escolhida para comparação é o painel sanduíche SPA 150S, projetado para parede exterior e cobertura. Este painel apresenta perfis de revestimento lisos, contendo um recheio de lã mineral e com uma espessura total de 150 mm. Não foi possível encontrar um modelo equivalente ao painel P2, com perfis de revestimento nervurados. No entanto, o painel selecionado assemelha-se ao painel ensaiado em termos de composição.

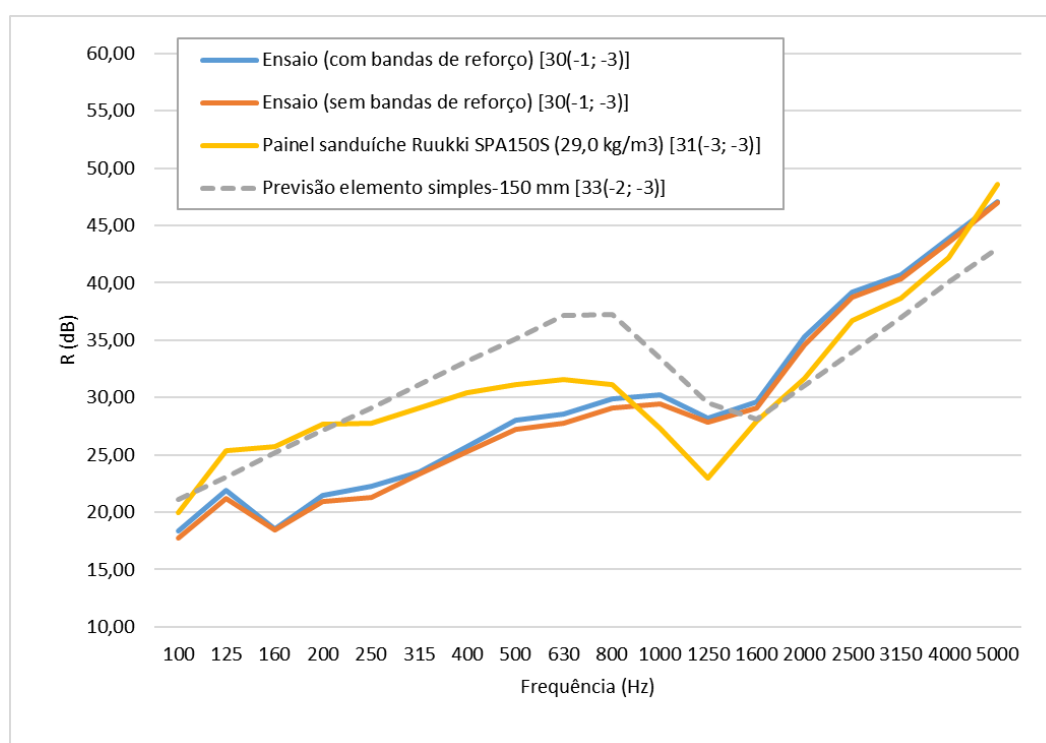


Figura 58- Comparação da redução sonora entre o painel P2, solução comercial e previsão pelo modelo de Sharp

A pequena diferença entre os resultados ensaiados e a solução comercial, de 1 dB, era esperada devido ao revestimento nervurado, embora essa variação não seja significativa para o desempenho acústico. Quanto à previsão do modelo de Sharp, era esperado que os resultados fossem superiores, devido a complexidade e as variações inerentes aos ambientes reais de aplicação.



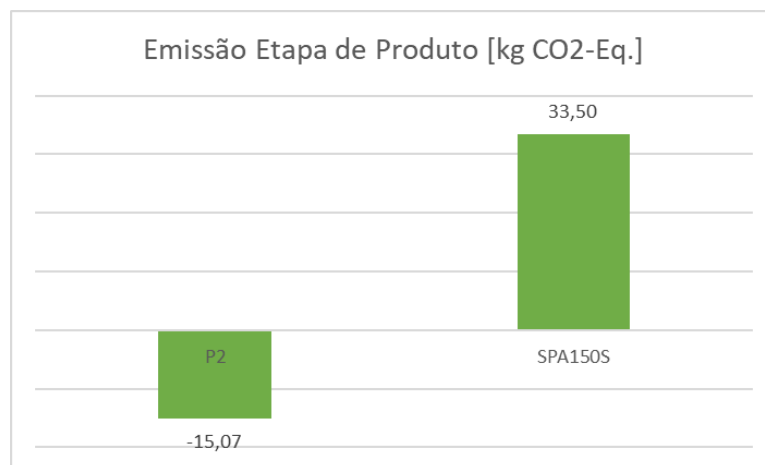


Figura 59- Comparação entre emissão de carbono de P2 e solução comercial

Em relação ao desempenho ambiental, o painel P2 exibe emissões negativas de carbono devido à fibra de madeira em sua composição, enquanto o painel comercial da Ruukki, SPA150S, mostra emissões de carbono mais altas por não conter materiais à base de madeira

#### 4.2.3.3. Sistema de Revestimento Duplo- P3

A solução comercial selecionada para comparação é o sistema de painel sanduíche duplo SPA 100S + caixa de ar + SPA 100S. Esse sistema consiste em duas camadas do painel sanduíche SPA, cada uma com espessura de 100 mm, separadas por uma caixa de ar com 220 mm, totalizando uma espessura de 420 mm. Assim como no caso do painel P2, não foi possível encontrar uma solução equivalente. No entanto, a opção escolhida apresenta resultados acústicos semelhantes, e foi feita a análise inversa, comparando as diferentes composições dos painéis.

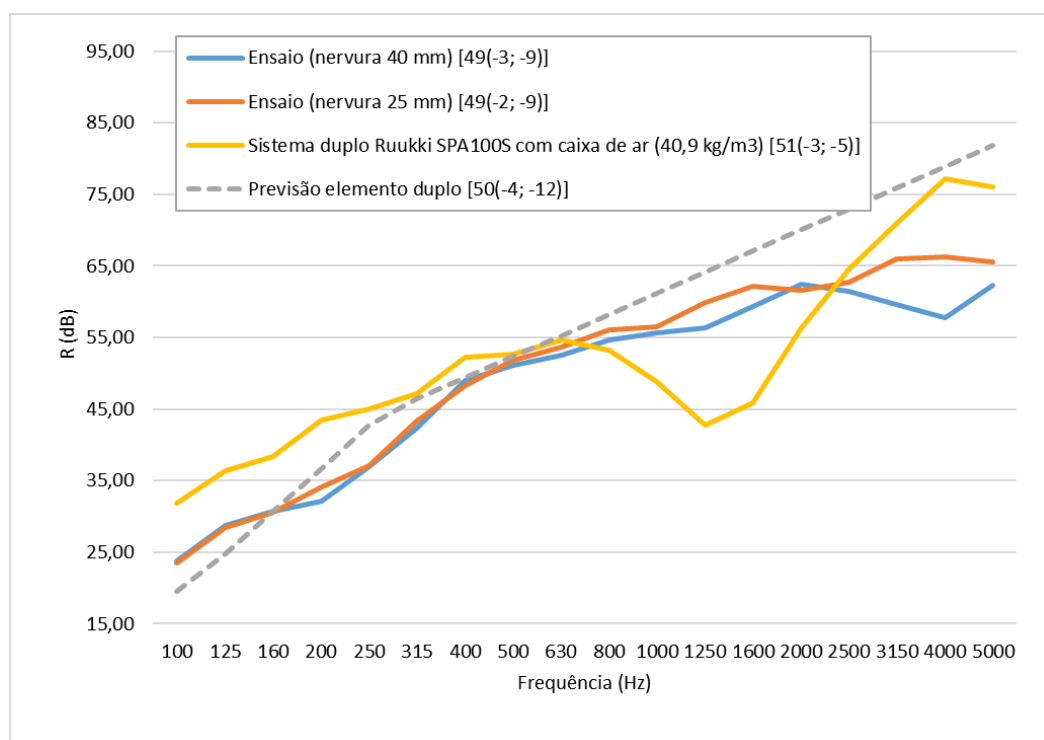


Figura 60- Comparação da redução sonora entre o painel P3, solução comercial e previsão pelo modelo de Sharp

É importante destacar que, para alcançar resultados significativos, a caixa de ar, quando desprovida de material isolante, necessita de espessuras substanciais, como é o caso do modelo comercial adotado. Portanto, o uso de materiais isolantes, como lã mineral ou fibras de madeira, apresenta vantagens, pois permite uma solução mais compacta.

No contexto de sistemas duplos, as camadas demonstram um comportamento praticamente independente, resultando em uma melhoria significativa no isolamento acústico, evidenciada pelo valor de  $R_w$  consideravelmente superior ao registrado para o painel sanduíche simples de mesma espessura. Essa solução pode ser vantajosa em situações que demandam maiores exigências acústicas.

Outra conclusão derivada da análise gráfica (Figura 60) é que a adoção de nervuras menores confere uma ligeira vantagem. No caso das nervuras maiores, a cavidade de ar vazia, especialmente na intersecção com perfis de fixação verticais, tem um impacto negativo nas altas frequências.

Para o sistema de painel sanduíche duplo, não foi fornecido o resultado da emissão de carbono durante a etapa de produção.

#### 4.2.3.4. Painel Sanduíche para Coberturas Planas- P4

A solução comercial selecionada para comparação é o painel sanduíche SPA 200S, o mesmo modelo utilizado para comparação de P2, porém, com espessura total de 200 mm.

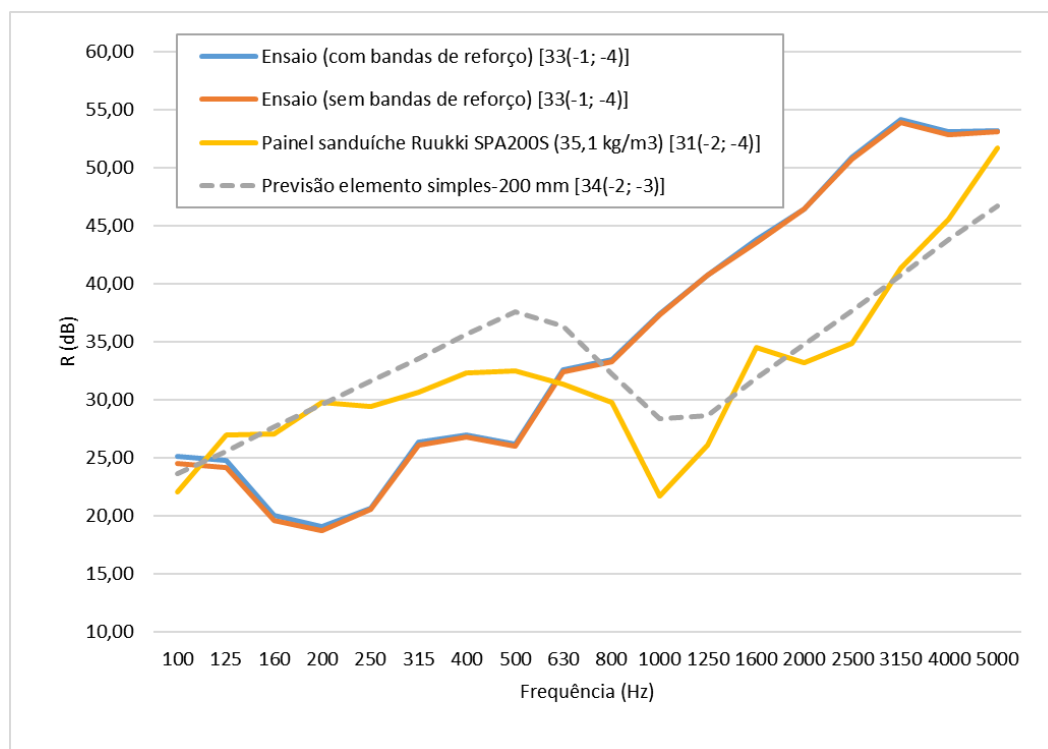


Figura 61- Comparação da redução sonora entre o painel P4, solução comercial e previsão pelo modelo de Sharp

Através da Figura 61, é evidente que os resultados dos ensaios, previsões e da solução comercial estão em grande proximidade, destacando o bom desempenho do painel P4.

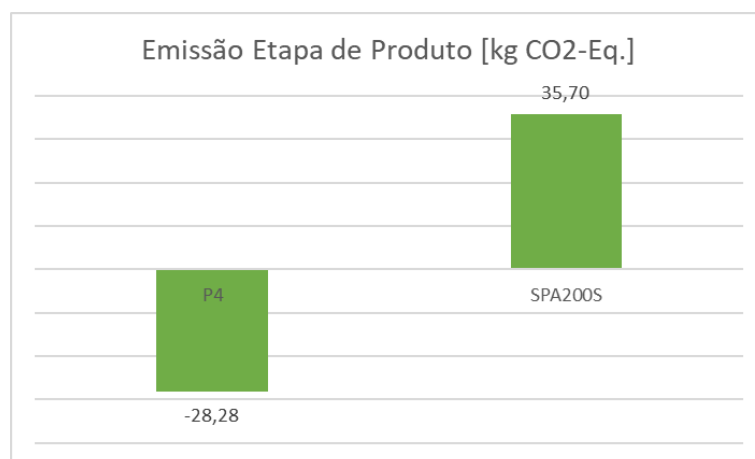


Figura 62- Comparação entre emissão de carbono de P4 e solução comercial

Assim como mencionado para os painéis P1 e P2, a elevada emissão de carbono da solução comercial da Ruukki, SPA200S, em comparação com o painel P4, reflete a ausência de materiais à base de madeira em sua composição.

## **5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES**

O principal objetivo deste estudo foi a avaliação do desempenho ambiental e acústico de painéis sanduíche com baixa emissão de carbono e, em seguida, a comparação com alternativas comerciais disponíveis no mercado.

A avaliação do desempenho acústico foi efetuado por meio de ensaios laboratoriais em câmaras acústicas, do DEC-UC, com o intuito de determinar o índice de redução sonora. Todos os ensaios foram realizados de acordo com as normas da série ISO 10140. Além disso, para fins comparativos, foi realizada uma previsão dos resultados utilizando a metodologia de Sharp.

Por outro lado, a avaliação ambiental concentrou-se na análise do ciclo de vida dos painéis, com foco na fase de produção. Para isso, utilizaram-se as declarações ambiental de produto (DAP) dos componentes de cada painel para calcular as emissões de carbono.

A etapa de produção de elementos construtivos não apenas se configura como um ponto crítico para a pegada de carbono, mas também realça a importância em tomar decisões criteriosas na seleção dos materiais que as compõem. Além disso, ressalta a urgência em adotar abordagens mais sustentáveis na fabricação dos componentes, visando minimizar os efeitos adversos no contexto do aquecimento global.

A análise ambiental dos resultados revela que os painéis que utilizam lã mineral apresentam maior emissão de carbono. A utilização das fibras de madeira não apenas contribui para a eficiência acústica, mas também para a eficiência energética e térmica dos painéis, mas estas não foram abordadas no presente trabalho. Além disso, observou-se que a contabilização do carbono biogênico exerce grande influência nos resultados finais para a emissão de carbono. A origem renovável da madeira e sua capacidade de ser reciclada ou degradada de forma sustentável ao final de sua vida útil, são fatores adicionais que fortalecem o perfil ambientalmente responsável desses painéis.

A escolha de materiais com menor impacto ambiental e a adoção de processos de produção mais eficientes não apenas contribuem para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> nesta etapa específica, mas também desempenham um papel fundamental na promoção da sustentabilidade global do produto. Em análise abrangente, os painéis estudados destacam-se pelo seu

desempenho ambiental superior em comparação com a solução comercial semelhante. Este êxito é atribuído, em grande parte, à incorporação das fibras de madeira como material isolante, que se destaca como uma escolha ambientalmente consciente e sustentável.

No que diz respeito ao desempenho acústico, os painéis demonstram resultados semelhantes em comparação com soluções já existentes. Em relação aos painéis sanduíche (P1, P2 e P4), submetidos a ensaios, tanto com quanto sem a utilização das bandas de reforço acústico nas juntas, notou-se que tal medida não se mostrou significativa. Isso se deve ao cuidado durante a preparação dos corpos de prova, de forma a eliminar eventuais lacunas nas juntas e no contorno. A mesma atenção não deve ser dispensada durante a instalação em construções reais, caso contrário, a aplicação das bandas de reforço torna-se necessária, levando a custos acrescidos.

Em relação à aplicação dos painéis em ambiente real, especialmente do painel P1, pode-se afirmar que a influência das transmissões marginais será mínima. Nesse caso, o isolamento é principalmente avaliado pelo  $R_w$ , uma vez que a redução dos fatores que consideram o volume do compartimento receptor, a área do elemento de separação e o tempo de reverberação é praticamente insignificante. Com base nos resultados obtidos, é viável concluir que estão em conformidade com as normas estabelecidas para fachadas pelo RRAE, sobretudo no contexto de edifícios residenciais e comerciais.

Ao apresentar resultados acústicos semelhantes e desempenho ambiental superior, pode-se concluir que os painéis estudados, à base de fibra de madeira, têm grande potencial em comparação com as soluções existentes.

Para trabalhos futuros em painéis sanduíche com fibras de madeira para isolamento sonoro, diversas direções promissoras podem ser exploradas. Uma área importante é a otimização do design para maximizar o desempenho acústico, buscando encontrar a configuração ideal de camadas e materiais para alcançar os melhores resultados. Além disso, investigar materiais alternativos, como fibras vegetais ou recicladas, pode oferecer novas perspectivas em termos de sustentabilidade e eficácia do isolamento sonoro.

Outro aspeto relevante seria a análise do comportamento dos painéis sob diferentes condições ambientais, visando garantir um desempenho consistente em uma variedade de ambientes. Isso

pode envolver estudos sobre a influência da humidade, temperatura e outros fatores ambientais na eficácia do isolamento sonoro proporcionado pelos painéis.

Quanto aos painéis utilizados neste trabalho, seria valioso submetê-los a análises abrangendo seu comportamento térmico e energético. Isso possibilitaria uma compreensão mais abrangente de seu potencial de forma global e suas aplicações em diversos contextos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. (2009) “Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Andrade, S.B. (2021). “Elaboração de painéis acústicos com a utilização de materiais sustentáveis alternativos”, Relatório Final para Título de Bacharel, Departamento de Design da Universidade de Alagoas, Maceió- Alagoas.
- André, F.B.V. (2014). “Materiais para uma construção sustentável: o caso da cortiça”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- APA (2004). “O Ruído e a Cidade”, Instituto do Ambiente, disponível em <http://www.apambiente.pt>, data da consulta: 18/07/2023.
- Batista, F.N.A. (2017). “O uso da cortiça na construção sustentável”, Dissertação de Mestrado em Especialização em Construções”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Bistafa, S.R. “Acústica aplicada ao controle de ruído” - 2ª edição- São Paulo: Blucher, 2011.
- Bragança, L & Silva, F. (2000), “Comparação entre modelos de previsão de isolamento sonoro a sons de condução aérea de elementos construtivos”, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga.
- Caldas, L.R. (2021). “Bioeconomia circular e mudanças climáticas: avaliação da pegada de carbono de paletes de madeira reutilizados”, *Mix Sustentável*, Florianópolis, Vol. 7, p. 27-40.
- Capão, J.C.S. (2018), “Desenvolvimento de parede interior modular em painel sandwich com núcleo em XPS”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Corrêa, L.R. (2009). “Sustentabilidade na Construção Civil”, Monografia de Curso de Especialização em Construção Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte.



Coutinho, J.S. (1999). *Sebenta de Materiais de construção 1 – Madeiras*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

DAPHabitat- Sistema de registo de declarações ambientais de produto. Disponível em: <https://daphabitat.pt>, data de consulta: 23/12/2023.

Decreto-Lei n.º 9/2007. (2007). *Aprovação do Regulamento Geral do Ruído*. Lisboa: Diário da República, 1.ª série - N.º 12 - 17 de Janeiro de 2007.

Decreto-Lei n.º 96/2008. (2008). *Altera o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*. Lisboa: Diário da República, 1.ª série - N.º 110 - 9 de Junho de 2008

Demarchi, C.A. (2010). “Aplicabilidade de placas de fibra de bananeira: produção, caracterização e absorção sonora”, Dissertação de Mestrado, Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina- UEL, Londrina.

Demarzo, M.A. & Porto, A.L.G. (2007), “Indicadores de Sustentabilidade (LCA) e Análise do Ciclo de Vida para Madeira de Reflorestamento na Construção Civil”, n. 2 ano 8, disponível em <https://www.researchgate.net/publication/319483421>.

Environmental Product Declaration- Cold Rolled Steel Coils, ArcelorMittal Europe.

Environmental Product Declaration- Dry Process Wood Fibre Insulation 110-200 kg/m<sup>3</sup>, PAVATEX.

Environmental Product Declaration- Stone Wool Insulation, ROCKWOOL.

“Exposição prolongada ao ruído causa 41 mil novas doenças cardíacas por ano na EU”, in Diário de Notícias, 21/06/2023. Disponível em:

<https://www.dn.pt/sociedade/exposicao-prolongada-ao-ruído-causa-41-mil-novas-doencas-cardiacas-por-ano-na-ue-16567615.html> (Data da consulta: 18/07/2023).

Falcão, L.C.L, (2019). “O sonómetro e as curvas de ponderação”, disponível em <https://www.concepcaoacustica.com/post/o-sonometro-e-as-curvas-de-ponderacao> (Data da consulta: 18/07/2023).

Faria, R.J.F. (2018). “Avaliação de ciclo de vida de um produto obtido por impressão 3d a partir de monofilamento com origem em garrafas PET”, Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

- Ferreira, D.M.R. (2016). “Comportamento Acústico de Fachadas: Isolamento Acústico versus Permeabilidade ao Ar”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Gomes, A.F.N. (2018). “Isolamento acústico de fachadas pela NP EN ISO 16283-3:2017: Análise da influência de desvios à norma”, Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gonçalves, J.F. (2014). “Caracterização das propriedades dos aglomerados de cortiça para isolamento térmico e acústico”, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- ISO 10140-1: 2010. Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 1: Application rules for specific products. Geneva.
- ISO 10140-2: 2010. Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 2: Measurement of airborne sound insulation. Geneva.
- ISO 10140-4: 2010. Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 4: Measurement procedures sound requirements. Geneva.
- ISO 14025: 2006. Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures.
- ISO 14045: 2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
- ISO 3382-2: 2008. Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 2: Reverberation time in ordinary rooms.
- Lima, T.M. (2022). “Sistema alternativo e sustentável na construção civil – madeira no canteiro de obra”, Trabalho de Conclusão de Curso para Bacharel em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade FASIPE, Cuiabá/MG.
- Mateus, D. (2022). “Acustica Aplicada- Isolamento a sons aéreos”, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Material de apoio à aula.

- Mateus, R.F.M.S. (2009). “Avaliação da Sustentabilidade da Construção- Proposta para o Desenvolvimento de Edifícios mais Sustentáveis”, Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil/ Processos de Construção, Escola de Engenharia Universidade do Minho, Braga.
- Moreira, A.I.G.C. (2015). “Desenvolvimento de um relatório de suporte à declaração ambiental de produto – perfis de alumínio”, Relatório de Estágio para Mestrado em Engenharia do Ambiente, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Neto, A.L. (2007). “Análise do som transmitido por madeiras de diferentes densidades”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais- Brasil.
- NP EN 15804:2022+A1: 2015. Sustentabilidade das obras de construção. Declarações ambientais dos produtos. Regras de base para as categorias de produtos de construção. Portugal.
- NP EN 717-1: 2020. Acústica — Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção — Parte 1: Isolamento a sons de condução aérea.
- Oliveira, F., (2021). “O que é Avaliação do Ciclo de Vida”, disponível em <https://www.sustenare.com.br/o-que-e-avaliacao-do-ciclo-de-vida/>, data da consulta: 18/07/2023.
- Pires, F.G.A.R.D. (2013). “Sistemas construtivos modulares em madeira”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Queiroz, N.T. (2016). “Construções Sustentáveis na Engenharia Civil e a Responsabilidade Social”, *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, p 255-263.
- Quintas, S.C.S. (2015). “Avaliação do desempenho ambiental do aglomerado negro de cortiça”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga.
- Rocha, O.S, Silva, A.C & Sá, G.G (2021). “Aplicação sustentável da fibra do babaçu como isolamento acústico em painéis de gesso”, XVII Congresso Internacional sobre Patologia e reabilitação de Construções, Fortaleza. Brasil.

- Ruukki- Wall structures <https://www.ruukki.com/building-envelopes/products/wall-structures>, data de consulta: 03/01/2023.
- Schuch, A., Oliveira, R.O & Steffens, F., “A potencialidade do uso das fibras naturais na engenharia civil e arquitetura”, 6º Congresso Científico Têxtil e Moda, UNIFEBE- Brusque.
- Silva, N. (2016). “Avaliação do Desempenho Acústico de Edifícios de Habitação”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- Silva, R.M.C. (2014). “Avaliação Acústica de Edifícios Habitacionais -Análise dos Coeficientes de Ponderação Associados aos Índices de Desempenho Acústico de Habitações”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Silva, S, Abelha, H., Ribeiro, P. & Figueiredo, M.J. (2007). “Guia Agenda 21 Local- Um desafio para todos”, APA.
- Souza, A.L.R & Morais, H.P. (2019). “Reaproveitamento do EPS na construção civil na produção de um concreto sustentável”, Centro Universitário de Patos de Minas, Minas Gerais- Brasil.
- Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L. & Mendes, P.A, (2010). “Acústica Aplicada”, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Tenório, M.C.U. (2022). “Sistema construtivo em painéis modulares para edifícios coletivos com estrutura de madeira”, Dissertação de Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis, Escola de Engenharia Universidade do Minho, Braga.
- Valle, B. (2019). “Análise de ciclo de vida de painéis solares em silício monocristalino”, Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharel em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Vasconcelos, P.F.L. (2020). “Estudo de viabilidade na utilização da fibra de coco para soluções de tratamento acústico em edificações”, Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Arquitetura e Urbanismo do Instituto CEUB de Pesquisa e Desenvolvimento (ICPD) do Centro Universitário de Brasília, Brasília.
- WCSD (1987), O Nosso Futuro Comum, Meribérica. Lisboa: Portugal.