



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Carolina Pereira da Silva Castelo Branco

PAINÉIS DE ISOLAMENTO COM BAIXO TEOR
DE CARBONO: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A
SUSTENTABILIDADE DE EDIFÍCIOS

Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Cidades Sustentáveis, orientada 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.

Julho de 2023

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

Carolina Pereira da Silva Castelo Branco

PAINÉIS DE ISOLAMENTO COM BAIXO TEOR DE CARBONO: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A SUSTENTABILIDADE DE EDIFÍCIOS

LOW CARBON INSULATION PANELS: A CONTRIBUTION TO BUILDING SUSTAINABILITY

Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Cidades Sustentáveis,
orientada 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.

Julho de 2023



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Ao concretizar esta dissertação, dou por terminada a etapa final do meu percurso académico e um dos maiores desafios. Assim, tenho a esperança de conseguir tecer os meus agradecimentos a todos os que estiveram presentes nesta jornada.

Em primeiro lugar, gostaria de exprimir o meu sincero agradecimento à minha orientadora, Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio. Estarei eternamente grata por todo o apoio, dedicação e amizade prestados e por todas as palavras de incentivo e conhecimento que me ajudaram a realizar esta dissertação e a crescer num futuro profissional.

No seguimento, reconheço a ajuda prestada ao nível do Laboratório ISISE por me permitir tomar parte nas atividades experimentais e a todos os funcionários pelo auxílio ao longo de todos os ensaios. De igual modo, pretendo agradecer ao Engenheiro Cláudio Martins pela ajuda e ensinamentos ao longo da atividade experimental, que não eram da minha área de formação. Aos meus Professores, que cooperaram para a minha formação académica e humana, com a transmissão de conhecimentos.

Também agradeço aos meus amigos Engenheiro José Heitor Soares e Engenheiro Denner Nunes, que sempre me ajudaram com a sua vasta experiência desde o início deste projeto. Da mesma forma, quero prestar a minha gratidão à Engenheira Eliana Inca pelas contribuições dadas.

Um imenso agradecimento não chega para dedicar à minha família o seu apoio incondicional. À minha mãe que esteve presente e sempre me incentivou nos meus objetivos. Ao meu avô, meu “pai” e meu Colega de Departamento, por todos os anos que esteve do meu lado, pela partilha de conhecimento e motivação. E à minha avó, a minha “segunda mãe”, por todo o carinho e dedicação ao longo de todos os meus anos de vida!

Por último, mas não menos importante, um agradecimento aos meus colegas e amigos, por todo o apoio ao longo deste percurso académico e com quem partilhei inúmeros desafios que enfrentámos, sempre com o espírito colaborativo. Em especial, à Ana Luísa Silva e ao Miguel Torres, por toda a ajuda, motivação e carinho que partilharam comigo, tornando-se essencial para a superação de obstáculos que foram surgindo, o meu enorme obrigada!

RESUMO

A presente dissertação pretende examinar o impacto ambiental e as suas considerações de sustentabilidade na indústria da construção. A produção de materiais de construção é identificada como um dos principais contribuintes, consumindo aproximadamente 50% dos recursos naturais da Terra. Adicionalmente, os resíduos de Construção e Demolição (C&DW) surgem como a maior fonte de resíduos na Europa, representando cerca de 33.5% do total de resíduos da EU-28 em 2014, com 871 milhões de toneladas. O setor da construção também desempenha um papel significativo e é responsável por cerca de 40% do consumo final de energia e das emissões de carbono. Para enfrentar esses desafios, esta pesquisa centra-se no desenvolvimento de soluções construtivas mais sustentáveis, utilizando materiais com menor impacto ambiental (baixo carbono incorporado) e alta eficiência térmica.

A dissertação está integrada no projeto *Innovative Ultra-low Carbon Building Steel Envelop Systems with Bio-based Insulation*, que visa o desenvolvimento de cinco painéis de isolamento do tipo sandwich, em aço, para envolventes de edifícios (fachadas e coberturas) com teor de carbono ultra-baixo. Isto é conseguido através de isolamentos à base de fibras de madeira e lã de rocha.

Este trabalho de investigação está estruturado nas seguintes partes principais:

- I. Realização de uma revisão alargada da literatura sobre materiais de isolamento, as suas propriedades, os seus impactos ambientais e quais as bases de dados usadas;
- II. Realização de uma Análise do Ciclo de Vida de dois tipos de painéis de isolamento, nomeadamente de lã de rocha e de fibra de madeira, considerando as diferentes etapas do ciclo de vida, como a produção, o transporte e o fim de vida;
- III. Comparação dos impactos ambientais dos painéis de isolamento já mencionados, com base nos resultados da ACV e determinar o material mais sustentável para uso na construção;
- IV. Investigação e comparação das técnicas de medição de deslocamentos, pela medição padrão (*Linear Variable Differential Transformer*) e pela correlação de imagem digital, no estudo dos deslocamentos dos painéis de isolamento já mencionados;
- V. Avaliação da viabilidade e potenciais vantagens ao usar a correlação de imagem digital como uma técnica de deslocamento para estudos futuros.

Palavras-chave: Impacto ambiental; emissões de carbono; fibras de madeira; análise de ciclo de vida; correlação de imagem digital.

ABSTRACT

The present dissertation intends to examine the environmental impact and its sustainability considerations in the construction industry. The production of building materials is identified as a major contributor, consuming approximately 50% of the Earth's natural resources. Additionally, Construction and Demolition (C&DW) waste in Europe, accounting for around 33.5% of total EU-28 waste in 2014, with 871 million tons. The construction sector also plays a significant role and is responsible for around 40% of final energy consumption and carbon emissions. To face these challenges, this research focuses on the development of more environmental constructive solutions, using materials with less environmental impact (low incorporated carbon) and high thermal efficiency.

The dissertation is part of the *Innovative Ultra-low Carbon Building Steel Envelop Systems with Bio-based Insulation project*, which aims to develop five sandwich-type insulation panels, in steel, for building envelopes (facades and roofs) with an ultra-low carbon content. This is achieved through insulation based on wood fibers and rock wool.

This research work is structured in the following main parts:

- I. Carrying out a complete review of the literature on insulation materials, their properties, their environmental impacts and which databases were used;
- II. Carrying out a Life Cycle Assessment of two types of insulation panels, namely rock wool and wood fiber, considering the different stages of the life cycle, such as production, transport and end of life;
- III. Comparison of the environmental impacts of the aforementioned insulation boards, based on the LCA results and determining the most sustainable material to use in construction;
- IV. Investigation and comparison of displacements measurement techniques, by standard measurement (LVDT) and by digital image correlation (*Linear Variable Differential Transformer*), in the study of displacements of insulation panels already mentioned;
- V. Assessing the feasibility and potential advantages of using digital image correlation as a lead-in technique for future studies.

Keywords: Environmental impact; carbon emissions; wood fibers; life cycle analysis; digital image correlation

ÍNDICE

Índice de Figuras	vii
Índice de Quadros	ix
Abreviaturas.....	x
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Introdução	5
2.2 Estado da Arte.....	6
2.2.1 Materiais Inorgânicos	6
2.2.2 Materiais Orgânicos de Base Não Renovável	8
2.2.3 Materiais Orgânicos de Base Renovável.....	9
2.2.4 Comparação das Declarações Ambientais do Produto	12
2.3 Conclusões	17
3 Análise do Ciclo de Vida dos Painéis	18
3.1 Aspetos Gerais	18
3.1.1 Definição de uma ACV	18
3.1.2 Limitações de uma ACV	19
3.1.3 Estrutura de uma ACV	19
3.1.4 Unidade declarada e unidade funcional de uma ACV.....	20
3.1.5 Limites do sistema de uma ACV	20
3.1.6 Fontes de dados para uma ACV	22
3.1.7 Potenciais indicadores ambientais a serem avaliados numa ACV	22
3.2 Avaliação Ambiental dos Painéis	23
3.2.1 Enquadramento.....	23
3.2.2 Painel com isolamento de lã de rocha	24

3.2.3	Painel com isolamento de fibra de madeira.....	30
3.3	Conclusões	36
4	Análise Experimental dos Painéis	38
4.1	Introdução	38
4.2	Instrumentação dos painéis	39
4.2.1	Medição dos deslocamentos com DIC no estudo de painéis de isolamento	39
4.2.2	Medição dos deslocamentos com LVDT no estudo de painéis de isolamento... ..	49
4.3	Resultados	52
4.3.1	Ensaio nº 1	53
4.3.2	Ensaio nº 2	54
4.3.3	Ensaio nº 3	56
4.3.4	Ensaio nº 4	58
4.4	Discussão	60
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	62
5.1	Conclusões	62
5.2	Trabalhos Futuros	64
	Referências Bibliográficas.....	65
	Anexo A - Dados do transporte rodoviário CML 2001- Aug. 2016	A-1
	Anexo B - Dados de resíduos em aterro CML 2001- Aug. 2016	B-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1.1 - Esquema modular da EN 15804:2012+A2:2019	21
Figura 3.2.1 - Imagem real do painel de isolamento com lã de rocha em forma de sandwich.	24
Figura 3.2.2 - Diagrama do painel de isolamento de lã de rocha.	26
Figura 3.2.3 - Descrição da fronteira do sistema para o painel de isolamento de lã de rocha..	27
Figura 3.2.4 - Pegada de carbono para o Painel 1, em percentagem.	29
Figura 3.2.5 - Imagem real do painel de isolamento com fibra de madeira em forma de sandwich.	30
Figura 3.2.6 - Diagrama do painel de isolamento de fibra de madeira.	32
Figura 3.2.7 - Descrição da fronteira do sistema para o painel de isolamento de fibra de madeira.	33
Figura 3.2.8 - Pegada de carbono para o Painel 2, em percentagem.	34
Figura 4.2.1 - (a) Fotografia do atuador hidráulico com célula de carga; (b) Fotografia real do atuador hidráulico.	40
Figura 4.2.2 - (a) Quadro com os valores do deslocamento e da velocidade; (b) Gráfico com as velocidades de carga ao longo do tempo (José Heitor Soares, relatório interno, 2023).	41
Figura 4.2.3 - (a) e (b) Fotografia das câmaras usadas nos testes experimentais, com máxima distância.	42
Figura 4.2.4 - Esboço do correto posicionamento das duas câmaras nos ensaios experimentais (Alterado de: Pan, 2018; José Heitor Soares, relatório interno, 2023).	42
Figura 4.2.5 - (a) Computador e respetivo software usado nos testes experimentais; (b) Padrão estocástico de qualidade.	44
Figura 4.2.6 - (a) Deslocamento do painel segundo a direção X; (b) Deslocamento do painel segundo direção Y; (c) Deslocamento do painel segundo direção Z	45
Figura 4.2.7 - Representação esquemática dos eixos X, Y e Z, em perspetiva plana.	45
Figura 4.2.8 - Comportamento esperado e observado ao nível dos quatro ensaios experimentais (Käpplein et al., 2011).	46
Figura 4.2.9 - Posição do ponto A nos painéis de isolamento de lã de rocha (Alterado de: José Heitor Soares, relatório interno, 2023).	47

Figura 4.2.10 - Posição do ponto B nos painéis de isolamento de fibra de madeira (José Heitor Soares, relatório interno, 2023).	48
Figura 4.2.11 - Posição do ponto C nos painéis de isolamento de fibra de madeira (José Heitor Soares, relatório interno, 2023).	48
Figura 4.2.12 - Posição do ponto D nos painéis de isolamento de fibra de madeira (José Heitor Soares, relatório interno, 2023).	49
Figura 4.2.13 - (a) Fotografia real do LVDT TML; (b) Fotografia real do LVDT a laser.....	50
Figura 4.2.14 - Desenho com a instrumentação dos LVDT's do ensaio nº 1 (José Heitor Soares, relatório interno, 2023).	51
Figura 4.2.15 - Desenho com a instrumentação dos LVDT's do ensaio nº 2, nº3 e nº4 (José Heitor Soares, relatório interno, 2023).	52
Figura 4.3.1 - Gráfico com os resultados do ensaio nº1 do painel de isolamento de lã de rocha, segundo direção Y.	53
Figura 4.3.2 - Gráfico com os resultados do ensaio nº2 do painel de isolamento de fibra de madeira, segundo direção Y.	55
Figura 4.3.3 - Gráfico com os resultados do ensaio nº3 do painel de isolamento de fibra de madeira, segundo direção Y.	57
Figura 4.3.4 - Gráfico com os resultados do ensaio nº4 do painel de isolamento de fibra de madeira, segundo direção Y.	58

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.2.1 - Valores dos diferentes indicadores de impacto ambiental para cada indicador para painéis de isolamento com fibra de madeira, considerando como unidade funcional 1m^2 de isolante (Schulte et al., 2021).....	12
Quadro 2.2.2 - Valores da condutibilidade térmica (U) para cada material isolante com base nas respetivas DAP's, considerando como unidade declarada 1m^2 de material isolante.	13
Quadro 2.2.3 - Descrição da fronteira do sistema para os diversos materiais com base nas respetivas DAP's, considerando como unidade declarada 1m^2 de material isolante.	15
Quadro 2.2.4 - Parâmetros que descrevem os potenciais impactos ambientais para o indicador do aquecimento global ($\text{kg CO}_2 \text{ eq.}$) para cada material segundo as respetivas DAP's, para uma unidade declarada de 1 m^3	16
Quadro 3.2.1 - Parâmetros que descrevem os potenciais impactos ambientais segundo o indicador do potencial de aquecimento global para o painel de isolamento de lã de rocha (Daphabitat, 2019; IBU, 2020a).	28
Quadro 3.2.2 - Parâmetros que descrevem os potenciais impactos ambientais segundo o indicador potencial de aquecimento global para o painel de isolamento de fibra de madeira (IBU, 2020b, 2020a).	34
Quadro 3.3.1 - Dados relativos à pegada de carbono para cada material, em $\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$...	36
Quadro 4.3.1 - Desvio relativo do deslocamento entre o LVDT A17 e o ponto A, na direção Y.	54
Quadro 4.3.2 - Desvio relativo do deslocamento entre o LVDT A25 e o ponto B, na direção Y.	56
Quadro 4.3.3 - Desvio relativo do deslocamento entre o LVDT A25 e o ponto C, na direção Y.	58
Quadro 4.3.4 - desvio relativo do deslocamento entre o LVDT A25 e o ponto D, na direção Y.	59

ABREVIATURAS

ACV – Análise de ciclo de vida

DAP – Declaração ambiental do produto

DIC – Correlação digital de imagem

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

EN – Norma Europeia

EPS – Poliestireno expandido moldado

GEE – Gases com efeito de estufa

GWP – Potencial de aquecimento global

ICB – Placa de cortiça expandida

ILCD – International Reference Life Cycle Data System

INCSEB – Innovative ultra-low Carbon building Steel Envelop systems with Bio-based insulation

ISISE – Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas

ISO – International standardization organization

LCI – Inventário do ciclo de vida

LCIA – Avaliação do impacto do ciclo de vida

LECA – Granulados leves de argila expandida

LVDT – Linear variable differential transformer

PUR – Espuma rígida de poliuretano

U – Condutividade térmica

XPS – Poliestireno extrudido moldado

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e motivação

A indústria da construção tem uma grande responsabilidade no consumo de recursos naturais, na utilização de energia, assim como em outros impactos ambientais. Os edifícios são responsáveis por uma parte substancial das emissões de gases com efeito de estufa, do consumo de energia e da produção de resíduos. Conforme o esforço da sociedade por todo o mundo, no sentido de minimizar as mudanças climáticas, de reduzir o consumo de energia e de promover o desenvolvimento sustentável, tem havido um reconhecimento gradual na obrigação em assumir condutas adequadas, ao nível ecológico, no setor da construção. A conduta ao nível da construção sustentável é a de reduzir a pegada ambiental nos edifícios, ao longo do seu ciclo de vida.

Os painéis de isolamento térmico para edifícios com baixo carbono incorporado caracterizam-se por serem constituídos por materiais que têm uma baixa pegada de carbono quando comparados com os materiais de isolamento tradicionais. Estes são feitos com base em materiais renováveis ou reciclados e são produzidos por meio de um processo de fabricação com a intenção de minimizar o consumo de energia e as emissões de gases com efeito de estufa.

O uso de painéis de isolamento com baixo carbono na construção civil contribui para a sustentabilidade da construção de diversas maneiras, como reduzir a pegada de carbono do edifício, em requerer menos quantidade de energia na produção e na instalação. Por consequência, é possível diminuir o impacto da construção do edifício no meio ambiente.

Este trabalho insere-se no âmbito do projeto europeu *Innovative ultra-low Carbon building Steel Envelop systems with Bio-based insulation* (INSCEB), o qual tem por objetivo o desenvolvimento de painéis de fachada e coberturas de edifícios com baixo teor em carbono. O desenvolvimento dos painéis inclui uma campanha de ensaios experimentais e análises numéricas para determinação dos vários parâmetros funcionais (por exemplo: parâmetros térmicos, acústicos e também ambientais) e estruturais (ex. rigidez dos painéis sob a ação de forças estáticas e dinâmicas no plano dos referidos painéis).

Assim, este trabalho de investigação compreende duas componentes principais: (i) uma componente funcional, a qual se irá focar na avaliação da sustentabilidade ambiental dos painéis; e (ii) uma componente experimental, a qual se irá focar no trabalho desenvolvido em laboratório para determinação da rigidez dos painéis para forças no seu plano.

Na componente funcional, uma vez que a fibra de madeira é considerada um material de isolamento recente, foi feita uma comparação com a lã de rocha, uma vez que é um dos materiais tradicionais mais utilizados nas construções. Assim sendo, foi feita uma análise do ciclo de vida (ACV) aos dois materiais, uma vez que a ACV tem a vantagem de avaliar de forma sistemática a sustentabilidade ambiental, bem como auxiliar no processo de tomada de decisão, na promoção de forma responsável de eco-materiais e oferecer uma maior transparência de todo o processo de produção ao mercado.

Por outro lado, a componente experimental teve como objetivo principal a determinação da rigidez dos vários painéis a forças no seu plano. Neste caso, o trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação consistiu no auxílio à preparação dos referidos ensaios, nomeadamente na sua instrumentação, e no tratamento dos resultados obtidos em termos de deslocamentos horizontais sob ação de diferentes cargas. Para este efeito foram instalados diversos transformadores diferenciais de variáveis lineares (LVDT). Além disso, foi também considerado um método alternativo para medição dos deslocamentos, designado por correlação digital de imagem (DIC), o qual permite igualmente obter o campo de deslocamentos de um objeto em regiões de interesse. Note-se que a análise do comportamento estrutural dos painéis não faz parte do âmbito desta dissertação.

A abordagem destes pontos importantes, permite que se tenha a compreensão dos painéis de isolamento de baixo carbono ao nível do seu desempenho ambiental, como por exemplo a pegada de carbono, e das características ao nível da rigidez no plano deslocamento, a qual é essencial para garantir a sua integridade estrutural e o seu desempenho a longo prazo.

Estes diversos aspetos serão aprofundados nos capítulos subsequentes. Esta pesquisa irá assim contribuir para o desenvolvimento e adoção de painéis de isolamento de baixo carbono, promovendo práticas de construção ecológicas.

1.2 Objetivos

Com esta dissertação pretende-se obter três objetivos principais:

- Obter da revisão bibliográfica uma visão alargada dos diversos materiais existentes para a construção, determinar qual a base de dados e metodologia mais usual para cada caso, e no final comparar os seus desempenhos ambientais para determinar os materiais com melhor desempenho;
- Realizar a avaliação de ciclo de vida de dois produtos para isolamento térmico de edifícios, um tradicional e outro mais recente, de forma a entender os seus impactos

ambientais ao longo de todo o seu ciclo de vida e averiguar qual o que tem menor impacto ambiental e qual o mais vantajoso em cada processo. Desse modo, é possível que as partes interessadas tenham conhecimento dos impactos ambientais destes materiais e tomar decisões informadas com base em resultados concretos e assim reduzir os impactos ambientais de todo o sistema de produção;

- Realizar o processamento dos resultados obtidos dos ensaios experimentais dos diversos painéis, e comparar o método mais tradicional, denominado por técnica de medição padrão com LVDT's, com o método mais recente denominado por correlação digital de imagens. Com esta comparação pretende-se avaliar a exatidão e a precisão do novo método, determinar se ele fornece todas as informações relevantes e necessárias, avaliar a sua eficiência, as suas limitações e potenciais erros de modo a serem evitados no futuro.

Note-se mais uma vez que neste trabalho não se pretendem tirar conclusões do ponto de vista estrutural dos diversos painéis, mas apenas proceder-se à comparação entre dois métodos distintos de obtenção de deslocamentos, como já referido. O comportamento estrutural dos painéis não faz parte do âmbito desta dissertação.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação, encontra-se organizada em cinco capítulos. O presente capítulo faz uma breve introdução do tema, fazendo referência ao enquadramento do mesmo nos dias de hoje, citando de forma sucinta os objetivos do estudo e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo, designado por 'Revisão bibliográfica', fornece uma cuidada revisão bibliográfica de diversos autores relativamente à Avaliação de Ciclo de Vida dos seguintes materiais: granulado leve de argila expandida (LECA), celulose, espuma rígida de poliuretano (PUR), espuma fenólica, fibras de madeira, granulado de cortiça expandida; lã de rocha, lã de vidro, placa de cortiça expandida (ICB), poliestireno expandido moldado (EPS) e poliestireno extrudido moldado (XPS). Este capítulo encontra-se separado em quatro partes, tendo como principal interesse o conhecimento das bases de dados usadas, a metodologia escolhida e as respetivas conclusões por parte de cada autor. A primeira secção analisa os materiais inorgânicos, a segunda averigua os materiais orgânicos de base não renovável e a terceira aborda os materiais orgânicos de base renovável. É possível encontrar uma pequena descrição de cada material assim como os limites do sistema considerados por cada revisão bibliográfica. Na quarta parte deste capítulo, expõe-se de forma sucinta, os dados acerca de cada material retirado das Declarações Ambientais do Produto (DAP).

No terceiro capítulo, designado de ‘Análise do Ciclo de Vida dos Painéis’, é feita uma descrição de uma ACV, e aplica-se esta metodologia a dois painéis de isolamento: (i) um painel de isolamento tradicional em lã de rocha; e (ii) o painel de isolamento em fibra de madeira, desenvolvido no âmbito do projeto INCSEB. Nesta comparação pretende-se determinar qual o produto com menor pegada carbónica.

O quarto capítulo apresenta o tratamento dos resultados experimentais dos dois painéis referidos no capítulo anterior, obtidos através dos métodos convencionais com LVDT e da Correlação Digital de Imagem. A comparação entre os dois métodos irá permitir determinar a precisão da medição dos deslocamentos com este último.

Por último, o quinto capítulo sintetiza os temas abordados ao longo deste estudo e ainda incita a trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

No momento presente, o setor da construção civil contribui drasticamente para os impactos ambientais, nomeadamente no aumento da poluição, na deterioração ambiental e na emissão de gases com efeito de estufa, que são libertados para a atmosfera (Gomes et al., 2020). De entre os gases com efeito de estufa encontra-se o dióxido de carbono cuja emissão representa cerca de 30%. É de realçar que os edifícios contribuem igualmente no consumo total de energia, valor esse que ronda os 40% (Asdrubali et al., 2016). Assim, é crucial diminuir este consumo de energia, assim como os impactos ambientais relacionados, sendo que uma das formas de reduzir estes valores é através da execução de edifícios mais eficientes do ponto de vista energético.

Assim, uma das formas de minimizar estes impactos ambientais, é a escolha de materiais isolantes mais eficazes na redução da perda de calor e consequentemente no consumo de energia (Biswas et al., 2016). Devido à grande variedade de materiais de isolamento, tornou-se essencial dividi-los em três grupos: materiais inorgânicos, materiais orgânicos de base não renovável e materiais orgânicos de base renovável. Os materiais inorgânicos representam atualmente cerca de 60% do mercado, por serem menos dispendiosos e mais abundantes, como é o caso da lã de rocha, da lã de vidro e dos granulados leves de argila expandida. Os materiais orgânicos de base não renovável representam aproximadamente 30%, como é o caso da espuma de poliuretano (PUR), do poliestireno expandido moldado (EPS) e do poliestireno extrudido moldado (XPS). No caso dos materiais orgânicos de base renovável, estes são mais escassos, representam apenas 10%, como é o caso da fibra de madeira, da cortiça, da celulose e da espuma fenólica (Füchsl et al., 2022).

De forma a mitigar os impactos ambientais, muitos construtores têm recorrido a biomateriais que se caracterizam por serem provenientes de recursos biológicos e que potenciam diversos benefícios ambientais, nomeadamente a redução do consumo de diversos recursos, fácil recuperação, reutilização e reciclagem dos materiais após o seu uso (Ardente et al., 2008).

Todavia, e ainda com o objetivo de minimizar os impactos ambientais, torna-se essencial a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de todos os produtos, de forma a investigar os impactos ambientais durante todo o ciclo de vida. Existem vários tipos de ACV, tais como: do berço ao túmulo (em inglês, denominado *cradle-to-grave*) (Buyle et al., 2013), do berço ao portão (denominado por *cradle-to-gate*) ou do berço ao berço. Uma ACV está dividida em quatro

etapas (ISO 14040:2006; ISO 14044:2006): (i) objetivo e âmbito onde são definidos os objetivos, a unidade funcional e os limites do sistema; (ii) Inventário do Ciclo de Vida (LCI) que se resume em reunir e descrever todas as informações do processo; (iii) a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (LCIA) com o intuito de quantificar os impactos e os recursos; e por último, (iv) a interpretação dos resultados. Com base na interpretação dos resultados obtidos, é possível atuar de forma a melhorar os diversos aspetos ao longo do ciclo de vida do material, como a saúde pública e o ambiente, tendo ainda em atenção que não haja a depleção dos recursos naturais (Buyle et al., 2013).

2.2 Estado da Arte

Seguidamente, serão referidos diversos estudos sobre a Avaliação de Ciclo de Vida dos materiais enumerados anteriormente, tendo em conta as bases de dados usadas em cada estudo, a metodologia escolhida.

2.2.1 Materiais Inorgânicos

A lâ de rocha provém de um material denominado lâ mineral e caracteriza-se por ser fabricada a partir de uma mistura de rochas vulcânicas, como o basalto, e rochas sedimentares como é o caso do calcário, uma vez que estes materiais são abundantes no meio ambiente (Assuncao, 2021; João et al., 2014). Por ser um material inorgânico e existir em abundância no mercado, é possível encontrar um leque diversificado de estudos sobre este material.

Um estudo recente (Oliveira Augusto et al., 2016) sobre diversos materiais, entre eles a lâ de rocha, usou como base de dados informações provenientes dos fabricantes dos produtos. Na opinião do autor seria importante estudar a lâ de rocha com base em duas metodologias. A primeira denomina-se de “Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-CS)”, a qual consiste em avaliar e comparar três componentes: ambiental, social e económico, admitindo o valor 0 como o pior resultado e o valor 1 como o melhor resultado. No entanto, esta metodologia tem uma limitação pois admite que cada componente tem uma ponderação fixa de 40%, 40% e 20%, respetivamente para o parâmetro ambiental, social e económico. A segunda metodologia é a ACV de modo a estudar diversos indicadores. Segundo este autor, a lâ de rocha apresenta uma baixa contribuição para o aquecimento global em comparação com os restantes materiais inorgânicos estudados e apresenta uma boa condutividade térmica.

A lâ de vidro, à semelhança da lâ de rocha, advém da junção de fibras minerais não cristalinas (como por exemplo a areia e o vidro) com um aglutinante cuja constituição consiste numa resina (IBU, 2021). Segundo Zieger et al. (2020), que pretendeu estudar a diferença entre materiais

biológicos e não biológicos, como foi o caso da lã de vidro, é crucial ter em atenção o horizonte de tempo escolhido para o estudo. Com o intuito de desenvolver esse estudo, o autor usou como bases de dados o Ecoinvent 3.2 e o OpenLCA 1.5 para ter a informação necessária e realizar o inventário do ciclo de vida. Para estudar o potencial de aquecimento global, o autor considerou um horizonte de tempo de 100 anos, dado ser o valor mais usual nos cálculos necessários.

Também este autor considerou duas metodologias: a Avaliação Estática de Ciclo de Vida e a Avaliação Dinâmica de Ciclo de Vida. O primeiro método intenta calcular a quantidade de CO₂ que é emitida e armazenada num sucessivo de anos, não dando a devida atenção a outros impactos ambientais. Esta metodologia rege-se de acordo com as normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. A segunda metodologia, a Avaliação Dinâmica de Ciclo de Vida, sendo a mais frequente, intenta comparar as emissões que são libertadas ao longo do ciclo de vida, ou seja, as emissões que são libertadas no início e as que vão sendo emitidas ao longo do tempo. Ambas as avaliações, são consideradas pelo autor como estando no limite do sistema (a abordagem do berço ao túmulo), uma vez que estudou o percurso todo do produto desde a sua extração até ao fim do tratamento, que no caso da lã de vidro foi depositada em aterro. De modo a concluir o seu estudo sobre a lã de vidro, o autor reforçou que estes materiais não biológicos resultam em elevados impactos ambientais desde o início, uma vez que libertam elevadas quantidades de gases com efeito de estufa (Zieger et al., 2020).

O último material inorgânico em estudo designado por o granulado leve de argila expandida (LECA), é obtido através da combinação de argila natural com matéria orgânica após sofrerem um aquecimento, que culmina numa significativa diminuição de massa do material resultante (Daphabitat, 2017). De acordo com Pargana et al. (2014), a base de dados Ecoinvent é o sistema mais adequado para obter as informações sobre os processos de produção deste material e o software SimaPro para modelar esses mesmos processos. Os restantes dados necessários foram providenciados pelas empresas e fábricas em Portugal. O autor começou por estudar o desempenho ambiental do produto através duma Análise de Ciclo de Vida, tendo em consideração os limites do sistema que se enquadram na abordagem “do berço ao portão”, investigando todos os aspetos desde a extração da matéria-prima até à fábrica e a sua produção.

Com o propósito de realizar a avaliação do impacto ambiental, Pargana et al.(2014) enveredou por duas metodologias. A primeira teve em consideração os indicadores que descrevem problemas ambientais na norma europeias EN 15804:2012 que são: o potencial de aquecimento global; o potencial da depleção da camada de ozono; o potencial de eutrofização; o potencial de acidificação do solo e da água; o potencial de formação de ozono troposférico e o potencial da depleção de recursos abióticos). Por outro lado, e no que respeita à energia acumulada, o autor considerou sete categorias, através de dois sistemas: o renovável e o não renovável.

Relativamente ao sistema renovável, os indicadores estudados foram: o eólico, o solar, o geotérmico e o hidráulico. Em contrapartida o sistema não renovável é constituído pelos seguintes indicadores: o fóssil, o nuclear e a biomassa. O autor concluiu que o LECA é um material com grande impacto ambiental no potencial de aquecimento global, obtendo o valor entre 7.42 kg CO₂ eq./kg a 8.07 kg CO₂ eq./kg.

2.2.2 Materiais Orgânicos de Base Não Renovável

Nos materiais orgânicos de base não renovável, pode-se encontrar o poliestireno expandido moldado (EPS), o poliestireno extrudido moldado (XPS) e a espuma rígida de poliuretano (PUR). O XPS caracteriza-se por ser um material resultante da combinação de poliestireno com agentes de expansão. Na opinião de Biswas et al. (2016) que realizou vários trabalhos sobre o XPS, a forma mais correta de efetuar uma avaliação dos impactos ambientais, é subdividindo os materiais em duas categorias: os impactos diretos e os impactos indiretos. Os impactos ambientais diretos permitem calcular a quantidade de energia que é absorvida pelos materiais e não dependem da vida útil do material isolante. Como forma de proceder ao cálculo deste tipo de impactos ambientais, o autor recorreu ao software SimaPro e à atual literatura para obtenção dos dados necessários. Em contrapartida, os impactos ambientais indiretos permitem avaliar a redução da quantidade de energia operacional e a quantidade de CO₂ evitada. A fim de proceder ao seu cálculo, foi usado o software EnergyPlus, que permite fazer diversas simulações. A metodologia utilizada nos dois tipos de impactos foi calculada de forma idêntica, usando para isso a abordagem “do berço ao túmulo”, que tinha por objetivo avaliar por completo o ciclo de vida do material desde a sua extração até ao fim de vida, englobando o transporte. O autor concluiu que, em relação aos impactos ambientais diretos, este material apresenta um valor elevado para o potencial de aquecimento global, uma vez que possui na sua constituição materiais de expansão. No entanto, em relação aos impactos ambientais indiretos, o XPS foi reconhecido como um material com baixo potencial de aquecimento global.

Em seguida será averiguado o material de poliestireno expandido moldado, mais conhecido por EPS. Este material provém de combustíveis fósseis, mais precisamente pela combinação de poliestireno com agentes de expansão e ainda calor (Biswas et al., 2016). Na opinião de Densley Tingley et al. (2015), a avaliação do impacto do ciclo de vida é capaz de ser estudado com base na metodologia do Sistema de Dados do Ciclo de Vida de Referência Internacional (ILCD). Esta metodologia permite compreender como se comporta o material em dezasseis categorias ambientais, nomeadamente: o potencial de aquecimento global; o potencial de depleção da camada de ozono; o potencial de toxicidade humana para efeitos cancerígenos e não cancerígenos; o material particulado; o potencial de acidificação; o potencial de eutrofização do solo, da água salgada e da água doce; o potencial de ecotoxicidade da água doce; o potencial de uso da terra; o potencial de depleção de recursos abióticos hídricos e fósseis; o potencial de

formação de ozono troposférico e o potencial de radiação ionizante tanto para a saúde humana como para os ecossistemas. De forma a obter estes dados, o autor recorreu à base de dados Ecoinvent e para os limites do sistema considerou uma abordagem “do berço ao portão”, na qual não está incluído os dados sobre o fim de vida deste material. Foi comprovado que o EPS é considerado um material com baixo impacto ambiental quando comparado com outros materiais orgânicos de base não renovável, uma vez que apresentou um baixo valor em quatorze das dezasseis categorias anteriormente referidas (Densley Tingley et al., 2015).

Para finalizar o estudo deste subcapítulo, o material em destaque prende-se com a espuma rígida de poliuretano, PUR. Este material é constituído por poliuretano, catalisadores e retardadores de chama (IBU, 2019d). Colli et al. (2020) avaliou este material com o software SimaPro e a base de dados Ecoinvent de modo a obter os dados adequados. A metodologia de avaliação consiste em ACV e considerando 16 indicadores ambientais. No entanto, o autor considerou que seria suficiente avaliar apenas quatro, dos dezasseis, sendo eles: o potencial de aquecimento global, o potencial de material particulado, o potencial de ecotoxicidade de água doce e o potencial de depleção de recursos abióticos. Este material apresentou um mau desempenho ambiental, uma vez que foram notórios os seus elevados valores nos indicadores de aquecimento global, material particulado e na ecotoxicidade de água doce.

Finalmente, um recente artigo pretendeu estudar a energia incorporada para estes três materiais orgânicos de base não renovável (Ricciardi et al., 2014). Com base nas mesmas bases de dados usadas para cada um dos materiais e com a abordagem “do berço ao portão”, o autor afirmou que o EPS apresentou o maior valor de consumo de energia (99.20 MJ/kg), seguido do PUR com um valor de 98.90 MJ/kg e por último o XPS.

2.2.3 Materiais Orgânicos de Base Renovável

A cortiça é considerada um material de base renovável e caracteriza-se por ser impermeável, com elevada elasticidade e por armazenar carbono nos seus tecidos ao longo da sua vida útil (Sierra-Pérez et al., 2016). No decorrer dos anos, foram desenvolvidas vastas literaturas sobre a cortiça, uma vez que pode ser estudada sob a forma de placa de cortiça expandida (ICB) ou granulado de cortiça expandida, entre outras formas. O ciclo de vida da cortiça inicia-se com a plantação e o crescimento do sobreiro. Após atingir uma altura adequada, procede-se à extração da casca, denominada por “falca”. Esta extração não danifica a árvore uma vez que a casca volta a desenvolver-se e a armazenar o carbono. Após uma limpeza cuidada da falca, o material resultante é encaminhado para ser triturado, obtendo-se assim os granulados de cortiça expandida. A placa de cortiça expandida obtém-se através dos granulados que são introduzidos numa autoclave, dando origem ao aglomerado. É importante de ressaltar, que durante o

processo dos dois materiais, não é introduzido nenhum fertilizante nem aditivos (Tártaro et al., 2017).

Num estudo realizado por Silvestre et al. (2016), relativamente ao estudo da placa de cortiça expandida, os valores necessários para proceder ao cálculo dos dados secundários, como a extração da falca, o gasto de eletricidade e de transporte, foram obtidos através do Ecoinvent v2.1. O software SimaPro 7.3 foi a plataforma utilizada na ACV de modo a modelar todo o processo. Os restantes dados necessários foram adquiridos junto das empresas. De acordo com o autor, para se proceder à análise do ciclo de vida, é comum escolher-se entre uma das abordagens “do berço ao portão” (Tártaro et al., 2017) ou “do berço ao berço” (Silvestre et al., 2016). Em ambas as abordagens de metodologia, os limites do sistema foram caracterizados por avaliarem a extração e produção, transporte, montagem dos produtos, o uso e o fim de vida. No caso da segunda abordagem, ainda foi incluída a reutilização, a recuperação e a reciclagem do produto.

No caso de estudo dos granulados de cortiça expandida (Demertzi et al., 2017), as bases de dados usadas pelo autor foram as mesmas que nos estudos da placa de cortiça expandida, acrescentando o método “International Reference Life Cycle Data System (ILCD)” de modo a calcular o carbono biogénico, e a abordagem da metodologia utilizada foi “do berço ao portão”. Segundo os autores deste estudo, foi possível concluir que, para uma vida útil de 30 anos, a placa de cortiça expandida apresenta uma maior quantidade de carbono armazenado de 2.183 kg CO₂ comparativamente com os granulados de cortiça expandida com um valor de 1.362 kg CO₂. Esta diferença prende-se com a maior área, a massa e a densidade da placa (Demertzi et al., 2017).

Através de um outro estudo (Dickson & Pavía, 2021), conseguiu-se fazer a comparação entre diversos materiais orgânicos e inorgânicos, entre os quais estão a espuma fenólica e a celulose. A espuma fenólica caracteriza-se por apresentar baixos valores de condutividade térmica, uma boa reação ao fogo (Schiavoni et al., 2016) (apesar de este não ser um parâmetro em estudo na presente dissertação) e elevada impermeabilidade (Dickson & Pavía, 2021). O fabrico da celulose é simples e é feito a partir da junção de 75% de jornal reciclado com a adição de 25% de aditivos compostos por minerais (Dickson & Pavía, 2021; ECIA, 2018). De acordo com Dickson & Pavía (2021), o software mais indicado a ser usado foi o IE-VE, o qual permitiu avaliar por completo o desempenho térmico a partir de uma simulação. Os restantes dados necessários foram adquiridos diretamente em fábrica ou através das Declarações Ambientais do Produto (DAP). Neste trabalho, a metodologia convencional de análise de ciclo de vida foi a adotada para os dois materiais (celulose e espuma fenólica), de acordo com as normas ISO 14040 e ISO 14044, considerando como abordagem principal “do berço ao portão”. Por essa razão, os limites do sistema incluem a totalidade do ciclo de vida da produção. Esta metodologia

permite avaliar os indicadores estabelecidos pelas normas, no entanto, na opinião dos autores foi suficiente estudar o potencial de aquecimento global; o potencial de depleção da camada de ozono; o potencial de eutrofização; o potencial de formação de ozono troposférico; o potencial de depleção de recursos abióticos e o potencial de acidificação. Adicionalmente, os autores escolheram uma outra metodologia para estudar as três componentes da sustentabilidade (o ambiental, o social e o económico), considerando que todas as componentes teriam o mesmo peso. Neste trabalho, foi concluído que a celulose obteve o melhor resultado no desempenho ambiental, seguido da espuma fenólica (Dickson & Pavía, 2021).

Posteriormente, será feita a análise da fibra de madeira, sendo este material o principal objetivo na presente dissertação. Num trabalho realizado por Rocchi et al.(2018), a base de dados utilizada para estudar a fibra de madeira foi o Ecoinvent, de modo a obter as informações sobre os dados secundários. Os dados primários foram recolhidos diretamente da fábrica. A produção da fibra de madeira começa com a poda da árvore, em virtude da matéria-prima resultante ser triturada após a chegada à fábrica. Após um processo de aquecimento, a matéria-prima (composta por 83% de fibra de madeira) é anexada a 17% de aditivos (Rocchi et al., 2018; Schulte et al., 2021), terminando por ser agregada e embalada.

Na opinião de Rocchi et al. (2018), a metodologia ideal para estudar o impacto ambiental resultante da fibra de madeira é a IMPACT 2002+, a qual permite combinar os indicadores do ciclo de vida, tendo em vista o dano ambiental causado no final. Assim, o impacto do painel composto por isolamento de fibra de madeira foi avaliado, tendo a fase de produção apresentado o maior impacto ambiental de todo o ciclo de vida, uma vez que a montagem do painel conduziu a um impacto de 40.6% na produção de fosfato de nitrato de amónio, 32.6% na produção de resina e 16.7% no consumo de energia. Assim, foi possível concluir que a produção de um painel de fibra de madeira é a etapa com maior impacto ambiental e que quanto maior for a massa desse painel, maior será o impacto associado.

Um outro estudo realizado por Schulte et al. (2021), tendo também como objetivo o comportamento ambiental do ciclo de vida da fibra de madeira, usou como base de dados o Ecoinvent. Este estudo seguiu as indicações das normas ISO 14040 e ISO 14044, de modo a examinar a abordagem “do berço ao túmulo”, que presencia quatro sistemas: o primeiro sistema instituiu o cultivo e extração da matéria-prima; o segundo incluiu o processo de fabrico; o terceiro compreendeu a fase de uso do painel em obras e o quarto e último, cujo conteúdo referiu, o fim de vida do material. A metodologia deste estudo incluiu a Avaliação dos Indicadores de Impacto Ambiental (LCIA) que permite conhecer os valores para as 18 categorias de impacto e que procedimento se deve proceder face a esses valores. Os indicadores denominados foram: o potencial de acidificação; o potencial de aquecimento global; o consumo de água; o potencial de depleção da camada de ozono; o potencial de depleção de recursos

abióticos elementares e fósseis; o potencial de ecotoxicidade da água doce, salgada e do solo; o potencial de formação de ozono para a saúde humana e para os ecossistemas; o potencial de matéria particulada; o potencial de radiação ionizante; o potencial de toxicidade cancerígena dos ecossistemas e humana e por último o potencial de uso do solo, dando origem aos valores indicados no Quadro 2.2.1.

Quadro 2.2.1 - Valores dos diferentes indicadores de impacto ambiental para cada indicador para painéis de isolamento com fibra de madeira, considerando como unidade funcional 1m² de isolante (Schulte et al., 2021).

Indicadores de Impacto Ambiental	Unidades	Valores
Potencial de acidificação	kg CFC11 eq.	0,01
Potencial de aquecimento global	kg CO ₂ eq.	2,72
Potencial de consumo de água	m ³	0,031
Potencial de depleção da camada de ozono	kg CFC11 eq.	0,000002
Potencial de depleção de recursos abióticos (elementares)	kg Cu eq.	0,02
Potencial de depleção de recursos abióticos (combustíveis fósseis)	kg cosbustível eq.	0,80
Potencial de ecotoxicidade aquática de água doce	kg 1.4-DCB	0,09
Potencial de ecotoxicidade aquática de água salgada	kg 1.4-DCB	0,12
Potencial de ecotoxicidade terrestre	kg 1.4-DCB	4,34
Potencial de eutrofização da água doce	kg P eq.	0,001
Potencial de eutrofização da água salgada	kg N eq.	0,0003
Potencial de formação de ozono para a saúde humana	kg NO _x eq.	0,01
Potencial de formação de ozono para os ecossistemas	kg NO _x eq.	0,01
Potencial de matéria particulada	kg PM _{2.5} eq.	0,004
Potencial de radiação ionizante	kBq C _o -60 eq.	0,21
Potencial de toxicidade cancerígena dos ecossistemas	kg 1.4-DCB	1,84
Potencial de toxicidade cancerígena humana	kg 1.4-DCB	0,27
Potencial de uso do solo	m ² colheita eq.	10,45

2.2.4 Comparação das Declarações Ambientais do Produto

Esta subsecção tem como principal objetivo compilar as diversas informações de análise do ciclo de vida para todos os materiais anteriormente referidos, obtidas com base em informação dos respetivos produtores através das Declarações Ambientais do Produto (DAP). Com esse propósito, as seguintes informações foram recolhidas através DAP para cada material: para a

celulose (ECIA, 2018); espuma de poliuretano (IBU, 2019d); espuma fenólica (IBU, 2019c); fibras de madeira (IBU, 2015); granulado de cortiça expandida (Daphabitat, 2016b); granulado leve de argila expandida (Daphabitat, 2017); lã de rocha (Daphabitat, 2019); lã de vidro (IBU, 2021); placa de cortiça expandida (Daphabitat, 2016a); EPS (IBU, 2019b) e XPS (IBU, 2019a).

As primeiras características a serem observadas são a condutibilidade térmica (U), que se apresenta pela unidade $W/m.^{\circ}C$, e a unidade declarada. Para ser eficiente termicamente, a condutividade térmica de um material de isolamento deve ser inferior a 0.065 ($W/m.^{\circ}C$) (Habitat, 2022). Com base no Quadro 2.2.2 é possível verificar que todos os materiais estudados se encontram nesse limite. No entanto, o isolamento composto por fibra de madeira é um material para o qual não é apresentado um valor e sim uma gama de valores em que deve estar compreendido. Isto deve-se à falta de informação e Declarações Ambientais do Produto sobre a fibra de madeira, o que se pode concluir que é um isolamento ainda pouco reconhecido.

Outro fator importante a ter em conta é a unidade. Em todos os casos de estudo, a unidade declarada para cada material de isolamento constou em $1m^2$ do material isolante com uma respetiva densidade. No entanto, apenas é possível comparar os materiais se estes apresentarem duas condições: a unidade funcional deverá ser similar, assim como os limites do sistema. Através do Quadro 2.2.2 é possível concluir que o material isolante com maior condutividade térmica é a LECA, e o material isolante com menor condutividade térmica é a espuma fenólica. No entanto, em relação à fibra de madeira, apesar de não ser apresentado um valor específico, esta apresenta uma gama de valores sendo que o valor inferior é o menor de todos os materiais presenciados. Ao longo da presente dissertação, será ainda estudado a análise do ciclo de vida de painéis de isolamento compostos por fibra de madeira e pretende-se identificar se o valor da condutividade térmica está enquadrado na gama de valores.

Quadro 2.2.2 - Valores da condutibilidade térmica (U) para cada material isolante com base nas respetivas DAP's, considerando como unidade declarada $1m^2$ de material isolante.

Painel de isolamento térmico constituído por:	U ($W/m.^{\circ}C$)	Gama de valores para U ($W/m.^{\circ}C$)
Celulose	0.039	-
Espuma de poliuretano (PUR)	0.026	-
Espuma fenólica	0.021	-
Fibras de madeira	-	0.037 a 0.05
Granulado de cortiça expandida	0.040	-
Granulado leve de argila expandida (LECA)	0.110	-
Lã de rocha	0.037	0.03 a 0.04

Lã de vidro	-	0.03 a 0.04
Placa de cortiça expandida (ICB)	0.040	-
Poliestireno expandido moldado (EPS)	0.031	-
Poliestireno extrudido moldado (XPS)	-	0.03 a 0.04

A ACV permite compreender como são os balanços de energia e de massa de um produto e como se comporta desde a sua extração, transporte, produção, uso e fim de vida (Hunkeler, 2016). Com esse intuito, foi estudado o ciclo de vida para os materiais isolantes anteriormente mencionados, conforme é apresentado no Quadro 2.2.3. Os dados são fornecidos pelas Declarações Ambientais do Produto respeitante a cada material.

Para todos os materiais, foi considerado para o limite do sistema, pelo menos, uma abordagem “do berço ao portão”, módulos A1 a A3. Há, no entanto, materiais para os quais as respetivas DAP apresentam outros módulos, como por exemplo a celulose, cuja abordagem foi “do berço ao túmulo”. Com base nestes aspetos, é possível proceder a uma comparação entre os materiais para a fase de produção, por ser um aspeto comum a todos. A etapa de produção (A1-A3) consiste em fornecer as informações relativas à extração da matéria-prima, o transporte até à fábrica onde vai ser produzido o material isolante e a própria produção (Hunkeler, 2016).

As Declarações Ambientais do Produto avaliam os potenciais impactos ambientais através de um grande leque de indicadores. Neste capítulo será apenas considerado o indicador do potencial de aquecimento global, expresso em kg CO₂ eq.

O Quadro 2.2.4 indica os valores para todos os materiais isolantes anteriormente referidos, para cada etapa de ciclo de vida. No entanto, apenas os valores da etapa de produção (módulos A1 a A3) serão comparados, uma vez que são os módulos comuns a todos os materiais. Desse modo, é possível concluir que o material PUR é o que produz um elevado potencial de aquecimento global na fase de produção, tendo um valor de 664 kg CO₂ eq./m³. Pelo contrário, as fibras de madeira são o material com menor potencial de aquecimento ao longo da sua produção (-164 kg CO₂ eq./m³).

Quadro 2.2.3 - Descrição da fronteira do sistema para os diversos materiais com base nas respetivas DAP's, considerando como unidade declarada 1m² de material isolante.

	Etapa de produção			Etapa de construção		Etapa de utilização							Etapa de fim de vida			Benefícios e cargas ambientais para além da fronteira do sistema	
	Extração e processamento de matérias-primas	Transporte	Produção	Transporte	Processo de construção e instalação	Utilização	Manutenção	Reparação	Substituição	Reabilitação	Uso de energia	Uso de água	Desconstrução e demolição	Transporte	Processamento de resíduos	Eliminação final	Potencial de reutilização, reciclagem e valorização
Painel de isolamento térmico constituído por:	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Celulose	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
PUR	V	V	V	V	V	-	-	-	-	-	-	-	-	V	V	V	V
Espuma fenólica	V	V	V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V	-	V
Fibras de madeira	V	V	V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V	-	V
Granulado de cortiça expandida	V	V	V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LECA	V	V	V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lã de rocha	V	V	V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lã de vidro	V	V	V	V	V	-	-	-	-	-	-	-	V	V	V	V	V
ICB	V	V	V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EPS	V	V	V	V	V	-	-	-	-	-	-	-	-	V	-	V	V
XPS	V	V	V	V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V	V	V	V

Quadro 2.2.4 - Parâmetros que descrevem os potenciais impactos ambientais para o indicador do aquecimento global (kg CO₂ eq.) para cada material segundo as respetivas DAP's, para uma unidade declarada de 1 m³.

Painel de isolamento térmico constituído por:		A1-A3	A4	A5	B1-B7	C1	C2	C3	C4	D
Celulose	Com biogénico	-56.63	2.64	0.82	0.00	0.17	0.53	0.00	59.40	-12.20
	Sem biogénico	7.09	2.64	0.82	0.00	0.17	0.53	0.00	10.04	-12.20
PUR (sem biogénico)		664.00	15.20	43.20	-	-	1.60	5.60	460.00	-282.00
Espuma fenólica (sem biogénico)		269.85	-	-	-	-	-	264.60	-	-107.45
Fibra de madeira (com biogénico)		-164.00	-	-	-	-	-	271.00	-	-226.00
Granulado de cortiça expandida (com biogénico)		-119.00	-	-	-	-	-	-	-	-
LECA (sem biogénico)		97.40	-	-	-	-	-	-	-	-
lã de rocha (sem biogénico)		43.20	-	-	-	-	-	-	-	-
ICB (com biogénico)		-198.00	-	-	-	-	-	-	-	-
EPS (sem biogénico)		47.59	0.82	1.62	-	-	0.27	-	49.98	-24.27
XPS (sem biogénico)		301.62	9.11	-	-	-	0.85	336.30	7.46	-115.10

2.3 Conclusões

De modo a ser encerrado este capítulo sobre a literatura estudada, é possível retirar algumas conclusões sobre ele.

Primeiramente, foi possível identificar que a base de dados e o software mais recomendados pelos autores para realizar uma ACV foi o Ecoinvent e o SimaPro, respetivamente. De igual forma, uma das metodologias mais usual é a avaliação através dos indicadores estabelecidos. Nos vários trabalhos analisados, os autores compararam diversos materiais de isolamento, sendo que é do consenso geral que os materiais orgânicos de base renovável são os mais adequados por diversos motivos: a sua extração não influencia outros fatores ou o meio ambiente, desde que seja extraída da forma correta; este tipo de materiais tem pouco impacto ambiental contribuindo com baixos valores do potencial de aquecimento global.

Em seguida, foi estudado o potencial impacto ambiental através do indicador do potencial de aquecimento global (GWP), para os diversos tipos de materiais, com base em informações obtidas diretamente dos produtores. Desse modo, foi necessário aceder às diferentes DAP's de cada material de modo a obter os valores que os produtores forneceram. Tendo em consideração que quanto maior for o valor do indicador maior é a sua contribuição para o impacto ambiental, é possível concluir pelo Quadro 2.2.4, que para a etapa de produção (A1-A3), o PUR é o material com maior impacto ambiental. Por outro lado, as fibras de madeira têm um menor impacto ambiental, devido ao sequestro de carbono durante o crescimento das árvores no seu meio natural (carbono biogénico).

3 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DOS PAINÉIS

Este capítulo tem como objetivo a avaliação do comportamento ambiental de dois painéis sandwich de isolamento térmico e acústico: (i) um composto por lã de rocha, e (ii) um composto por fibra de madeira. Note-se que sendo painéis sandwich, ambos os painéis são constituídos nas faces exteriores por chapas metálicas finas e apenas o interior varia de acordo com o descrito.

A avaliação do comportamento ambiental de ambos os painéis será realizada com base em Análises do Ciclo de Vida (ACV), tendo por base a metodologia descrita em Guinée (2002).

Assim, em seguida a metodologia de ACV adotada será brevemente descrita, sendo depois aplicada aos dois painéis.

3.1 Aspetos Gerais

3.1.1 Definição de uma ACV

Uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) caracteriza-se como sendo uma metodologia que tenciona avaliar os impactos ambientais de um determinado produto ou sistema ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde o momento em que se procede à extração das matérias-primas até à fase final de eliminação ou reciclagem. A vantagem de se poder empregar uma ACV, prende-se com o facto desta avaliação responder a todas as etapas do ciclo de vida, nomeadamente: a extração de matérias-primas; o transporte; o fabrico do produto com o seu respetivo uso e no fim a respetiva eliminação ou reciclagem.

Esta metodologia tem dois propósitos fundamentais: (i) quantificar os impactos ambientais causados pelo produto em estudo e, (ii) identificar as áreas em que é possível efetuar melhorias, de forma a mitigar esses impactos. Assim sendo, a ACV tem potencial para, além de poder comparar o desempenho ambiental de diferentes produtos, ajudar na tomada de decisões sobre um projeto ou produção no caso do setor da construção.

Resumindo, a ACV é uma ferramenta usada frequentemente na avaliação sobre sustentabilidade e permite ser utilizada numa vasta gama de produtos e sistemas, desde produtos individuais até a cadeias de fornecimento completas.

3.1.2 Limitações de uma ACV

Tal como mencionado anteriormente, a ACV torna-se uma ferramenta vantajosa, uma vez que tem o intuito de avaliar os impactos ambientais de produtos ou sistemas. No entanto, evidencia algumas limitações: (i) no que respeita à disponibilidade dos dados, uma vez que frequentemente estes não estão disponíveis ou são insuficientes; (ii) os limites do sistema se não forem apropriados são capazes de afetar os resultados, conduzindo a conclusões imprecisas ou enviesadas; (iii) as simplificações e as suposições feitas nos modelos podem conduzir a conclusões erradas, uma vez que podem não reproduzir a realidade com o devido rigor.

Acima de tudo, é conveniente ter estas limitações em consideração, quando se pretende interpretar os resultados de uma ACV na avaliação da sustentabilidade de materiais.

3.1.3 Estrutura de uma ACV

Uma ACV é constituída por quatro etapas (Guinée, 2002): (i) a definição do objetivo e os limites do sistema; (ii) a avaliação do inventário; (iii) a avaliação dos impactos, e (iv) a interpretação de resultados.

Na primeira etapa são definidos: os objetivos, incluindo o propósito do estudo; bem como os limites do estudo; a unidade declarada e/ou a unidade funcional; as fontes de bases de dados usadas; e as partes interessadas no estudo.

A segunda etapa designa-se por análise do inventário e consiste em quantificar e agrupar os dados de todas as entradas e saídas associadas ao ciclo de vida. Tem como propósito, elaborar um inventário com todos os detalhes dos materiais, tais como: as matérias-primas, a energia necessária para o processo, as emissões libertadas e os resíduos gerados. É ainda nesta fase que se encontra o diagrama de fluxo e a categoria dos dados; a qualidade e recolha dos dados; os processos unitários; a validação; a multifuncionalidade e alocação e os métodos de cálculo.

A terceira etapa é conhecida como avaliação dos impactos e pretende avaliar os impactos ambientais com base nos dados recolhidos na etapa anterior. A avaliação de impactos compreende ainda as seguintes fases: (i) a seleção das categorias de impacto (existindo uma lista padrão de categorias divididas em “categorias de impacto básicas”; “categorias de impacto específicas do estudo” e “outras categorias de impacto”); (ii) a classificação dos dados do inventário em função dos indicadores selecionados; e (iii) a caracterização desses dados relativamente a cada indicador.

Podem ainda ser consideradas duas etapas opcionais que são (i) a normalização (calcula a magnitude dos resultados em comparação com valores de referência), e (ii) a ponderação, com o propósito de refletir sobre a importância relativa de cada categoria.

A última etapa refere-se à interpretação e traduz-se na análise dos resultados dos vários indicadores tendo em consideração os objetivos da análise. Assim, é possível identificar as maiores fontes de impacto ambientais; avaliar as incertezas; verificar a consistência dos métodos e modelos; estabelecer as limitações do estudo; a descrição das conclusões e propor melhorias quanto à produção do material.

Em todas as fases, é recomendado focar nas quatro áreas de proteção, principalmente, quando se estuda uma determinada categoria e observar quais as que podem ser afetadas. São elas: a saúde humana; o meio ambiente natural; o meio ambiente criado pelo homem e os recursos naturais.

3.1.4 Unidade declarada e unidade funcional de uma ACV

Numa ACV as unidades declarada e funcional são conceitos-chave que permitem quantificar e comparar o impacto ambiental de diferentes produtos em estudo.

Entende-se como unidade declarada, a medida que é declarada pelos fabricantes do produto. Esta unidade pode ser definida em termos de massa, de volume ou outras medidas relevantes. Por outro lado, entende-se por unidade funcional a medida quantitativa padrão que mede e define o desempenho do produto nos impactos ambientais e que é usado como base para comparar os impactos ambientais e o uso de recursos de diferentes produtos (Habitat, 2022). Esta unidade tem sempre uma ou mais funções associadas e é a única unidade que pode ser utilizada numa ACV comparativa.

3.1.5 Limites do sistema de uma ACV

Os limites do sistema numa ACV devem ser definidos consoante os objetivos do estudo. Estes limites determinam as etapas do ciclo de vida analisados, bem como as entradas e as saídas consideradas.

De acordo com a norma EN 15804:2012 + A2:2019, o ciclo de vida de um produto é definido por um sistema modular, o qual é ilustrado na Figura 3.1.1, composto por diferentes módulos, cada um correspondente a uma fase do ciclo de vida do produto.

Por outro lado, podem ser definidas diferentes ACV, dependendo dos módulos considerados na análise. Assim, pode ter-se

- Uma análise “Cradle-to-Gate”, módulos A1 a A3: estuda desde o berço até ao portão, incluindo as etapas iniciais até ao ponto de entrega do produto ao consumidor (esta análise compreende as fases específicas do ciclo de vida que são diretamente controladas pelo fabricante ou produtor);
- Uma análise “Cradle-to-Grave”, módulos A1 a C4: estuda desde o berço até ao túmulo que inclui todas as etapas do ciclo de vida, desde a extração de matéria-prima até à eliminação final;
- Uma análise “Cradle-to-Cradle”, módulos A1 a D: estuda desde o portão até ao portão e compreende todas as fases do ciclo de vida, incluindo a reutilização, reciclagem ou outro tipo de aproveitamento.

De acordo com a EN 15804:2012+A2:2019, quando se realiza uma análise de ciclo de vida a um produto, torna-se obrigatório, estudar os seguintes módulos: A1 ; A2 ; A3 ; C1 ; C2 ; C3 ; C4 e D.

DESCRIÇÃO DA FRONTEIRA DO SISTEMA																
ETAPA DE PRODUÇÃO			ETAPA DE CONSTRUÇÃO		ETAPA DE UTILIZAÇÃO								ETAPA DE FIM DE VIDA			BENEFÍCIOS E CARGAS AMBIENTAIS PARA ALÉM DA FRONTEIRA DO SISTEMA
Extração e processamento de matérias-primas	Transporte	Produção	Transporte	Processo de construção e instalação	Utilização	Manutenção	Reparação	Substituição	Reabilitação	Uso de energia (operacional)	Uso de água (operacional)	Desconstrução e demolição	Transporte	Processamento de resíduos	Eliminação final	Potencial de reutilização, reciclagem e valorização

Obrigatório

Obrigatório

Figura 3.1.1 - Esquema modular da EN 15804:2012+A2:2019

Em resumo, os limites do sistema são um fator a ter em conta numa ACV uma vez que determinam a abrangência e a precisão do estudo. É importante definir claramente os limites do sistema e as suposições consideradas ao defini-los, garantindo a transparência do estudo.

3.1.6 Fontes de dados para uma ACV

Existem basicamente duas fontes de dados ambientais para uma ACV: bases de dados genéricas e base de dados específicas. As primeiras são bases de dados com base em valores médios para uma determinada área e relativos a um determinado período de tempo. Estas bases de dados são normalmente disponibilizadas em software específico de ACV. Por outro lado, as bases de dados específicas são aquelas que disponibilizam informação ambiental relativa a produtos específicos de um determinado produtor. Esta informação é normalmente disponibilizada sob a forma de uma Declaração Ambiental de Produto (DAP). O trabalho apresentado nesta dissertação foca-se neste tipo de informação.

Uma DAP tem como principal objetivo esclarecer as partes interessadas sobre os impactos ambientais associados a um produto e a tomar decisões de compra devidamente informada ou pode ainda ser usada pelos produtores de modo a permitir que as empresas possam avaliar e corrigir os seus impactos ambientais.

A informação disponibilizada numa DAP inclui a extração das matérias-primas, a produção, o transporte, o uso e a eliminação final. Inclui ainda informações sobre o consumo de energia, as emissões de gases com efeito de estufa e a geração de resíduos.

Sumariamente, as DAP's são uma ferramenta adequada uma vez que proporciona a transparência e a responsabilidade por parte das empresas de construção e desempenham um papel importante na promoção da sustentabilidade e a redução do impacto ambiental dos produtos.

3.1.7 Potenciais indicadores ambientais a serem avaliados numa ACV

Normalmente numa ACV são considerados vários indicadores ambientais e a sua seleção depende do objetivo da análise. De entre os vários indicadores existentes, destacam-se os seguintes:

- Potencial de acidificação;
- Potencial de aquecimento global;
- Potencial da depleção da camada de ozono;
- Potencial de ecotoxicidade aquática, terrestre e de ecossistemas;
- Potencial de eutrofização;
- Potencial de foto-oxidantes;
- Potencial de depleção de recursos abióticos (elementares ou de combustíveis fósseis);
- Potencial de toxicidade humana;

- Potencial do uso da água;
Potencial do uso do solo.

Estes indicadores podem ajudar a identificar os possíveis impactos ambientais associados a um produto em estudo e fornecer informações sobre as oportunidades de melhoria ambiental. No entanto, e tal como referido, a seleção dos indicadores deve ser baseada nos objetivos e limites do sistema em estudo e pode variar dependendo do tipo de produto a que se apresenta.

Assim, a análise seguinte irá focar-se sobre o indicador “Potencial de aquecimento global (GWP)”, o qual indica a quantidade de Gases com Efeito de Estufa (GEE) contribuindo para o aquecimento global, tendo como referência o dióxido de carbono.

Este indicador é bastante importante uma vez que permite compreender o impacto ambiental que um determinado produto pode ter nas alterações climáticas. Assim, este indicador será o objeto de estudo ao longo deste capítulo para a análise de ciclo de vida dos painéis de isolamento de lã de rocha e fibra de madeira. Este indicador é expresso em CO₂ equivalente e traduz-se por ser uma medida que pretende expressar a quantidade de gases com efeito de estufa que são emitidos para a atmosfera. É uma forma de converter os diferentes tipos de GEE, numa unidade de medida comum baseada no potencial de aquecimento de dióxido de carbono.

3.2 Avaliação Ambiental dos Painéis

3.2.1 Enquadramento

Neste sub-capítulo apresenta-se a avaliação ambiental de dois painéis de isolamento, com base numa ACV. Neste caso, o comportamento ambiental refere-se aos impactos ambientais associados ao ciclo de vida do painel em questão, desde a extração das matérias-primas até à eliminação no fim de vida ou de reciclagem.

Os dois painéis em análise são (i) um painel sandwich constituído por lã de rocha; e (ii) um painel sandwich constituído por fibras de madeira. Pretende-se assim determinar qual o painel com menor impacto ambiental, GWP, no sentido de concluir qual os materiais com menor pegada carbónica.

As quantidades de materiais consideradas em ambos os painéis serão as necessárias para satisfazer a unidade funcional considerada na ACV.

3.2.2 Painel com isolamento de lã de rocha

Como já foi referido anteriormente, a ACV serve como uma metodologia utilizada para avaliar as possíveis repercussões ecológicas associadas a um produto ao longo do seu ciclo de vida. Neste âmbito, procede-se à análise do ciclo de vida de um painel sandwich de isolamento composto por lã de rocha, num cenário específico para facilitar a sua análise.

i. Cenários considerados para as diferentes fases da ACV

O isolamento composto por lã de rocha é considerado um dos materiais mais comum na construção civil e é responsável por uma participação maioritária de 60% no mercado (Sierra-Pérez et al., 2016). Este material é feito com base em rocha vulcânica e rocha sedimentar, tal como o basalto e o calcário, respetivamente (João et al., 2014). A lã de rocha caracteriza-se por ser um material inorgânico proveniente de materiais existentes na natureza (Assuncao, 2021), sendo de fácil manutenção e com bom desempenho térmico (Schiavoni et al., 2016).

O produto em investigação designa-se por **Painel 1**, e é composto por uma estrutura em sandwich, composta por duas chapas de aço exteriores, em que entre elas se encontra a espuma de lã de rocha, conforme é ilustrado na Figura 3.2.1. Considerou-se que o contexto geográfico para a montagem deste painel de isolamento foi feito em Coimbra, Portugal.



Figura 3.2.1 - Imagem real do painel de isolamento com lã de rocha em forma de sandwich.

A unidade funcional designada para esta análise compreende uma área de 1m x 1,130m com função de painel de isolamento térmico, para uma vida útil de 50 anos.

No âmbito desta investigação, foram analisadas fases distintas do ciclo de vida, incluindo a etapa de produção (A1-A3); o transporte desde o local de produção até ao local de montagem (A4); a substituição do material (B4); a eliminação final após o uso do painel (C2); o transporte de fim de vida (C4); bem como a avaliação dos benefícios externos e os impactos ambientais para além dos limites do sistema (D). Esta avaliação priorizará principalmente a análise do indicador do potencial de aquecimento global (GWP). A vida útil considerada para a lã de rocha e para a chapa de aço é de 50 anos (Daphabitat, 2019; IBU, 2020a). A lã de rocha em estudo apresenta um coeficiente térmico de 0.037 W/m.K (Daphabitat, 2019).

A fase de produção (A1-A3) da lã de rocha começa com a extração da matéria-prima, ou seja, com a extração do basalto e do calcário. Após a extração da matéria-prima, os grãos de rochas vulcânicas e sedimentares são juntos e aquecidos a uma temperatura de 160°C, resultando num conjunto de fibras unidas pela adição de aglutinantes (Schiavoni et al., 2016). Esta extração pode provocar impactos ambientais e como tal, de modo a calcular o indicador do potencial de aquecimento global para esta etapa, os seus valores foram retirados da respetiva DAP (Daphabitat, 2019). Os valores da chapa de aço são obtidos através da respetiva DAP (IBU, 2020a), para assim se fazer o cálculo dos impactos ambientais na fase de produção.

A lã de rocha usada no painel de isolamento é proveniente de Santo Tirso, Portugal, situada a 148.7 km do local de montagem. Adicionalmente, o transporte da chapa de aço de Luxemburgo, situado a 2020 km de Coimbra, para o local de montagem está de igual forma enquadrado na fase de transporte (A4).

Como já referido, de acordo com (IBU, 2020a), a chapa de aço apresenta uma vida útil de 50 anos, da mesma forma que a lã de rocha apresenta a mesma vida útil, segundo (Daphabitat, 2019). O painel de isolamento em estudo, constituído por lã de rocha e chapa de aço, é avaliado para uma vida útil de 50 anos, de acordo com a unidade funcional. Tal significa que, para a ACV, a etapa B4 tomará um valor de zero, pois não é necessário efetuar nenhuma substituição destes materiais ao longo dos 50 anos.

Após a utilização do painel de isolamento, assume-se que se trata do final da vida útil do mesmo e por isso foi considerado que cerca de 90% da lã de rocha é reciclado e os restantes 10% depositam-se num aterro sanitário. Admite-se de igual forma, o mesmo cenário e os mesmos valores para o caso da chapa de aço. O aterro sanitário em questão localiza-se em Santo Tirso, estando a uma distância de 148.7 km de Coimbra. Para a fase C2, procede-se de maneira semelhante à fase A4, exceto na distância, que é a mesma. No caso da etapa C4, que permite calcular o potencial de aquecimento global para a eliminação final do painel, considerou-se que 80% da lã de rocha e apenas 10% da chapa de aço são encaminhadas para o aterro sanitário. O transporte mencionado nas etapas A4 e C2 foi realizado por camião, contribuindo

negativamente para os impactos ambientais uma vez que contribuem com a emissão de gases de efeito de estufa.

A última fase a ser avaliada faz referência aos benefícios e às cargas ambientais que estão incluídas fora do sistema (D). Para tal, os valores desta fase foram retirados das respetivas DAPs, tanto para a lã de rocha como para a chapa de aço. No final do processo procede-se à avaliação dos valores para a concretização do painel de isolamento.

É com base nestes cenários que se torna possível fazer uma análise ao ciclo de vida do painel de isolamento de lã de rocha e da chapa de aço, tendo por base o potencial de aquecimento global. Estes valores são demonstrados no Quadro 3.2.1, e a fronteira do sistema em estudo é apresentada na Figura 3.2.3.

ii. Diagrama

O diagrama apresentado de seguida, pretende esquematizar as entradas, as saídas e os processos das etapas do ciclo de vida do painel de isolamento de lã de rocha em estudo, nomeadamente as etapas: A1; A2; A3; A4; C2 e C4.

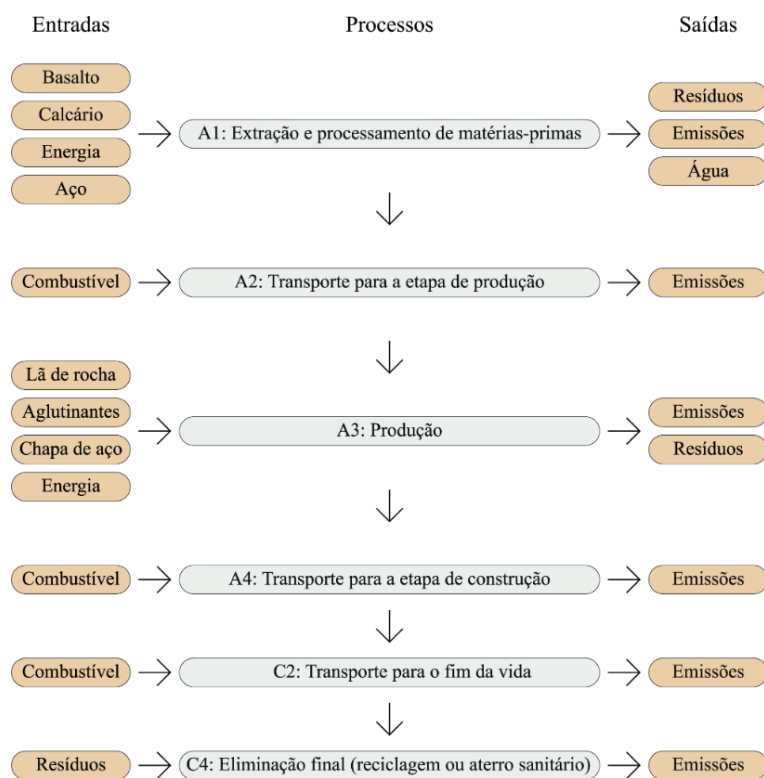


Figura 3.2.2 - Diagrama do painel de isolamento de lã de rocha.

iii. Resultados

A partir dos cenários apresentados anteriormente, foi possível proceder aos cálculos com a intenção de adquirir os valores para todos os materiais de acordo com a descrição da fronteira do sistema para o painel de isolamento apresentada na Figura 3.2.3.

DESCRIÇÃO DA FRONTEIRA DO SISTEMA																	
Material	ETAPA DE PRODUÇÃO			ETAPA DE CONSTRUÇÃO		ETAPA DE UTILIZAÇÃO							ETAPA DE FIM DE VIDA			BENEFÍCIOS E CARGAS AMBIENTAIS PARA ALÉM DA FRONTEIRA DO SISTEMA	
	Extração e processamento de matérias-primas	Transporte	Produção	Transporte	Processo de construção e instalação	Utilização	Manutenção	Reparação	Substituição	Reabilitação	Uso de energia (operacional)	Uso de água (operacional)	Desconstrução e demolição	Transporte	Processamento de resíduos	Eliminação final	Potencial de reutilização, reciclagem e valorização
Lã de rocha	V	V	V	V	-	-	-	-	V	-	-	-	-	V	-	V	V
Chapa de aço	V	V	V	V	-	-	-	-	V	-	-	-	-	V	-	V	V
Painel 1	V	V	V	V	-	-	-	-	V	-	-	-	-	V	-	V	V

Figura 3.2.3 - Descrição da fronteira do sistema para o painel de isolamento de lã de rocha.

Em primeiro lugar, é necessário ter em consideração que para a área de painel em estudo, a lã de rocha tem uma densidade de 30 kg/m^3 e a chapa de aço uma densidade de 7850 kg/m^3 . Para além da área já mencionada, o Painel 1 apresenta uma espessura total de aproximadamente 10 cm (0.5 mm para cada chapa de aço e entre elas 10 cm de espuma lã de rocha).

Os dados adquiridos para as etapas A1-A3 foram retirados das respetivas DAP segundo o potencial de aquecimento global. Para as etapas A4 e C2, uma vez que correspondem ao transporte, é necessário ter em consideração alguns fatores como a distância percorrida, a massa do material (em toneladas) e o meio de transporte utilizado. Com base nestes dados e com base na Eq. (1), foi possível determinar o impacto devido ao transporte:

Eq. (1)

$$GWP(\text{transporte}) = \alpha * m * d$$

sendo que α é um valor tabelado (apresentado no Anexo A) que depende da distância e do transporte considerado, e é expresso por tonelada e por km; m representa a massa do material em estudo (em toneladas) e d representa a distância (em km). Assim, para o caso das etapas A4 e C2, que representam o transporte, foi considerado um valor de $0.0503 \text{ kg CO}_2 \text{ eq./ton.km}$ para α .

A seguir, procedeu-se ao cálculo da etapa C4. Com base no cenário descrito, apenas 10% do painel vai para aterro sanitário. Com base nessa percentagem, é possível proceder ao cálculo do potencial de aquecimento global, considerando o aterro sanitário. A Eq. (2) traduz o cálculo desse impacto:

Eq. (2)

$$GWP (aterro) = \beta * m$$

β representa o impacto de 1 kg de resíduo depositado em aterro (valor tabelado no Anexo B conforme o indicador em estudo), tendo-se neste caso considerado um valor de 0.0144 kg CO₂ eq./kg de resíduo; e m corresponde ao massa em estudo, em kg, que é dirigida para o aterro.

Por último, a etapa D foi avaliada com base nos dados fornecidos das respetivas DAPs. No entanto, a declaração ambiental do produto da lã de rocha não fornece os dados relativos a esta etapa. Desse modo, admitiu-se um valor de zero para a fase D.

Assim, os valores correspondentes ao Painel 1 encontram-se no Quadro 3.2.1.

Quadro 3.2.1 - Parâmetros que descrevem os potenciais impactos ambientais segundo o indicador do potencial de aquecimento global para o painel de isolamento de lã de rocha (Daphabitat, 2019; IBU, 2020a).

Parâmetros que descrevem os potenciais impactos ambientais segundo GWP em kg CO₂ eq./m³						
Parâmetro	A1 - A3	A4	B4	C2	C4	D
Lã de rocha	4.40E+00	2.54E-02	0.00E+00	2.54E-02	3.91E-02	0.00E+00
Chapa de aço	2.11E+01	9.01E-01	0.00E+00	6.63E-02	2.55E-02	-1.32E+01
Painel 1	2.55E+01	9.27E-01	0.00E+00	9.17E-02	6.46E-02	-1.32E+01

Com base nos valores obtidos, é possível formular um gráfico que permita visualizar estes valores, em percentagem. Esse gráfico é apresentado de seguida.

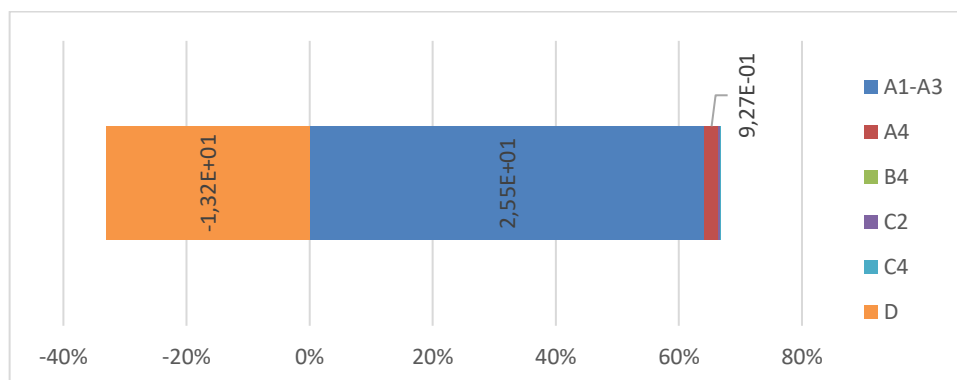


Figura 3.2.4 - Pegada de carbono para o Painel 1, em percentagem.

iv. Discussão

Os resultados apresentados indicam que a lã de rocha apresenta um impacto ambiental relativamente menor em comparação com a chapa de aço em diversas etapas do ciclo de vida. Nas etapas A1-A3, que representam a fase de produção, a lã de rocha tem um valor de GWP de 4.4 kg CO₂ eq. enquanto a chapa de aço apresenta um valor superior. Isso indica que a lã de rocha é responsável por menos emissões de gases com efeito de estufa durante a extração das matérias-primas.

Na etapa A4, que expressa o transporte entre o local de extração das matérias-primas e o local de montagem do painel, a lã de rocha mantém a sua vantagem uma vez que apresenta um valor de 2.54E-02 kg CO₂ eq., enquanto a chapa de aço apresenta um valor superior. Essa diferença implica que o transporte da chapa de aço tem um impacto ambiental mais substancial nesta etapa devido as emissões associadas ao transporte, uma vez que provém de fora de Portugal (maior distância) e tem mais massa.

Em relação aos resíduos que são depositados em aterro (C4), a lã de rocha gera mais resíduos em comparação com a chapa de aço. Considerando os impactos ambientais para além da fronteira do sistema (D), a lã de rocha tem um valor nulo, enquanto a chapa de aço apresenta um valor negativo. Neste contexto, os valores negativos representam benefícios, o que leva a concluir que a chapa de aço demonstra uma contribuição positiva nos impactos para além da fronteira do sistema.

Ao avaliar o Painel 1, que combina a chapa de aço e a lã de rocha, é importante considerar o impacto cumulativo de ambos os materiais. O valor de GWP alinham-se com os valores da chapa de aço, o que significa que o impacto ambiental do painel em estudo é influenciado pelo

componente de chapa de aço, uma vez que este contribuiu significativamente para o valor do GWP. Com base no gráfico presente na Figura 3.2.4, é possível verificar que a etapa de produção das matérias-primas tem uma grande contribuição na pegada carbónica, superior a 50%.

3.2.3 Painel com isolamento de fibra de madeira

Como já foi referido anteriormente, a análise do ciclo de vida serve como forma de abordagem a ser usada na avaliação dos impactos ambientais de um produto ao longo do seu ciclo de vida. Neste caso, será feita uma análise do ciclo de vida de um painel de isolamento de fibra de madeira, sendo também necessário definir os cenários para o seu estudo.

i. Cenários considerados para as diferentes fases

O painel de isolamento em estudo é um painel (**Painel 2**) em forma de sandwich e consiste em duas chapas de aço e entre elas encontra-se a espuma de fibra de madeira, mais conhecida como Pavathex, conforme é apresentado na Figura 3.2.5. Foi considerado que o local de montagem do painel é em Coimbra, Portugal.

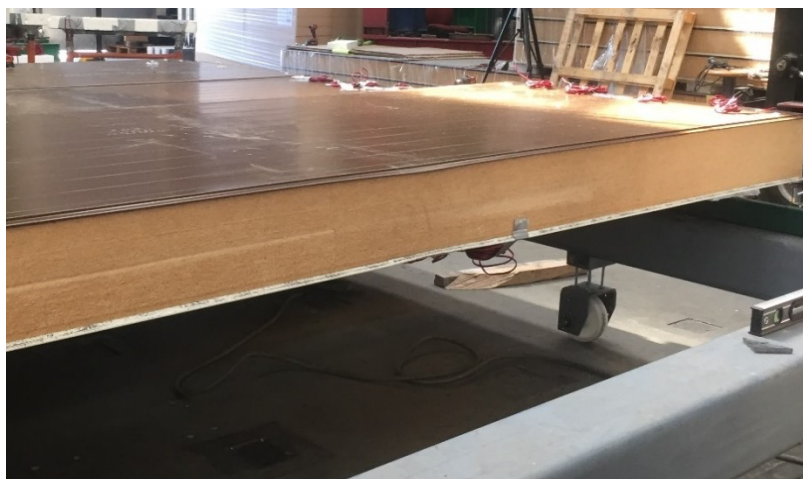


Figura 3.2.5 - Imagem real do painel de isolamento com fibra de madeira em forma de sandwich.

A unidade funcional em estudo, coincide com a anterior, e reflete uma área de 1m x 1,130m com função de painel de isolamento. Neste caso, a espessura do painel é de 20 cm. Os limites do sistema para esta análise abrangem a etapa de produção (A1-A3); o transporte desde a etapa de produção até ao local de montagem (A4); a substituição dos materiais (B4); a eliminação

final após o uso do painel (C2); o transporte de fim de vida após o uso do painel (C4) e a etapa que estuda os benefícios e cargas ambientais para além da fronteira do sistema (D). Esta análise terá como foco principal o indicador de potencial de aquecimento global. A fibra de madeira apresenta um coeficiente térmico de 0.044 W/m.K (IBU, 2020b).

A fase de extração (A1-A3) da fibra de madeira começa com a poda da árvore uma vez que se trata de um material orgânico de base renovável, uma vez que a matéria-prima resultante é triturada quando chega à fábrica. Após um processo de aquecimento, a matéria-prima que é constituída por 83% de fibra de madeira é anexada a aditivos, resultando num agregado (Rocchi et al., 2018; Schulte et al., 2021). De modo a obter-se os valores para o potencial de aquecimento global do Pavathex, recorreu-se à sua respetiva DAP (IBU, 2020b). Para a chapa de aço, a obtenção dos seus valores provém da sua respetiva DAP (IBU, 2020a).

O material Pavathex usado no painel de isolamento provém de Golbey em França, com uma distância de 1863 km do local de montagem. Em contrapartida, a chapa de aço usada vem do Luxemburgo, com uma distância de 2020 km de Coimbra. O transporte destes materiais, desde a sua origem de extração até Coimbra, local de montagem do painel, está incluído na etapa A4.

Segundo (IBU, 2020a) a chapa de aço apresenta uma vida útil de 50 anos, por outro lado, segundo (IBU, 2020b) a fibra de madeira apresenta um valor de 10 anos para a sua vida útil. Como o estudo a ser realizado para o Painel 2 tem em conta uma vida útil de 50 anos, isso significa que é necessário substituir a fibra de madeira presente no painel de 10 em 10 anos. De modo a obter os respetivos valores para esta fase (B4), é necessário multiplicar o somatório de todas as fases para os primeiros 10 anos e de seguida multiplicar por 5, obtendo-se assim um valor correspondente a esta fase para o painel de fibra de madeira, para 50 anos. Como dito anteriormente, a chapa de aço apresenta uma vida útil de 50 anos, o que significa que a etapa B4 terá um valor nulo, pois não requer a substituição do material em questão, ao longo dos 50 anos de estudo.

No final da vida útil do painel, assume-se que 20% do material de fibra de madeira será encaminhado para a reciclagem, enquanto os restantes 80% vão para aterro sanitário. Deste modo, é possível avaliar a etapa C2 e C4, assumindo que o aterro sanitário se localiza em Santo Tirso, Portugal. Desse modo a distância média entre o local de montagem, Coimbra, e o aterro é de 148.7 km. Neste caso, será também considerado o módulo C3 correspondente ao processamento de resíduos.

Por último, a etapa final (D) é avaliada nos benefícios e cargas ambientais para além da fronteira do sistema. Assim, os respetivos valores para o painel de isolamento tiveram como origem as respetivas DAPs.

Com base nos cenários descritos, para realizar uma análise de ciclo de vida de um painel de isolamento de fibra de madeira, foi possível fazer um breve resumo, a descrição da fronteira, como é apresentada na Figura 3.2.7. É de observar que a figura apresentada é praticamente igual tanto para isolamento de fibra de madeira como para isolamento da lã de rocha, uma vez que pretendemos comparar os dois materiais e dessa forma os estágios a serem avaliados têm de ser iguais.

Com base nesta avaliação e com os resultados que serão obtidos, procede-se à avaliação dos impactos ambientais do painel de isolamento de fibra de madeira com base no potencial de aquecimento global. Assim, obtém-se informações valiosas que podem ser usadas para otimizar a produção do painel de isolamento e os respetivos estágios de fim de vida de modo a minimizar o seu impacto ambiental.

ii. Diagrama

O diagrama presente na Figura 3.2.6, pretende esquematizar as entradas, as saídas e os processos das etapas do ciclo de vida do painel de isolamento de fibra de madeira em estudo, nomeadamente as etapas: A1; A2; A3; A4; C2 e C4.

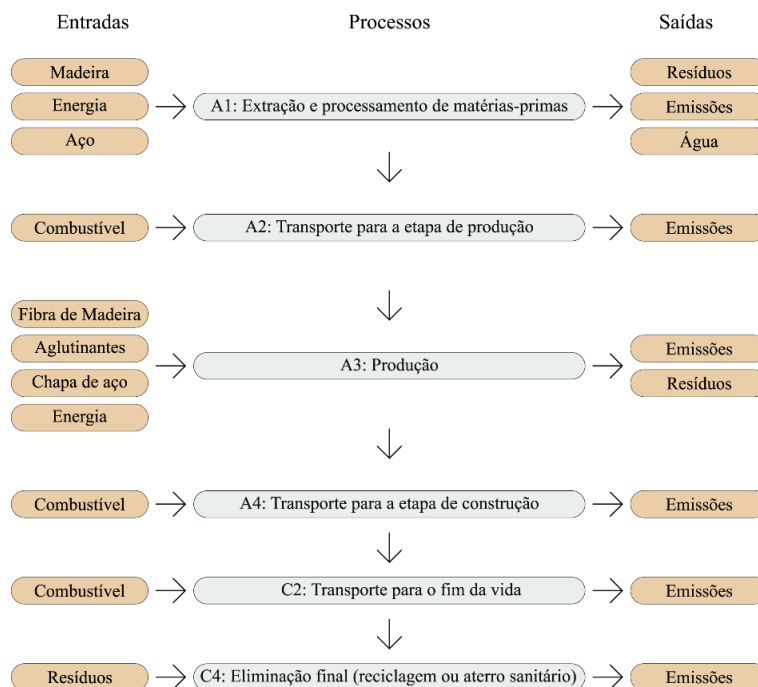


Figura 3.2.6 - Diagrama do painel de isolamento de fibra de madeira.

iii. Resultados

Com o cenário descrito para o painel de isolamento de fibra de madeira, foi possível proceder-se ao cálculo da análise de ciclo de vida para o material de fibra de madeira (Pavathex) e chapa de aço de forma isolada e posteriormente para o painel sandwich, denominado por Painel 2. A figura seguinte pretende esquematizar a descrição da fronteira do sistema em estudo para o Painel 2, constituído por isolamento de fibra de madeira.

DESCRIÇÃO DA FRONTEIRA DO SISTEMA																	
Material	ETAPA DE PRODUÇÃO			ETAPA DE CONSTRUÇÃO		ETAPA DE UTILIZAÇÃO							ETAPA DE FIM DE VIDA			BENEFÍCIOS E CARGAS AMBIENTAIS PARA ALÉM DA FRONTEIRA DO SISTEMA	
	Extração e processamento de matérias-primas	Transporte	Produção	Transporte	Processo de construção e instalação	Utilização	Manutenção	Reparação	Substituição	Reabilitação	Uso de energia (operacional)	Uso de água (operacional)	Desconstrução e demolição	Transporte	Processamento de resíduos	Eliminação final	Potencial de reutilização, reciclagem e valorização
Fibra de madeira	V	V	V	V	-	-	-	-	V	-	-	-	-	V	V	V	V
Chapa de aço	V	V	V	V	-	-	-	-	V	-	-	-	-	V	V	V	V
Painel 2	V	V	V	V	-	-	-	-	V	-	-	-	-	V	V	V	V

Figura 3.2.7 - Descrição da fronteira do sistema para o painel de isolamento de fibra de madeira.

De acordo com a DAP, considerou-se que a densidade das fibras de madeira é de 200 kg/m³. Além da área mencionada anteriormente, o Painel 2 tem espessura total de cerca de 0.20 m, sendo 0.5 mm para cada chapa de aço e entre elas, uma camada de espuma de fibra de madeira com 0.20 m de espessura.

Da mesma forma que foi analisado ao pormenor o cálculo das etapas para o Painel 1, também o painel de isolamento de fibra de madeira será analisado. As informações obtidas para as etapas A1-A3, C3 e D foram extraídas das respetivas DAP's, considerando que o indicador em estudo é o potencial de aquecimento global. Em relação às etapas A4 e C2, que envolvem o transporte, são vários os fatores que precisam de ser considerados, como é o caso da distância percorrida, da massa do material e o meio de transporte empregado. Com base nesses dados recolhidos, foi possível aplicar a Eq. (1) apresentada anteriormente.

Posteriormente, procede-se ao cálculo do fim de vida do painel pela etapa C4. Considerando que cerca de 80% do painel é depositado em aterro sanitário, é possível proceder ao cálculo desta etapa, segundo o indicador do potencial de aquecimento global, como já foi analisado no Painel 1 através da Eq. (2).

Para finalizar, a última etapa a ser estudada é a etapa D, considerando que os dados foram igualmente extraídos pela respetiva DAP. Os valores obtidos desta análise para o Painel 2 encontram-se no Quadro 3.2.2.

Quadro 3.2.2 - Parâmetros que descrevem os potenciais impactos ambientais segundo o indicador potencial de aquecimento global para o painel de isolamento de fibra de madeira (IBU, 2020b, 2020a).

Parâmetros que descrevem os potenciais impactos ambientais segundo GWP kg CO ₂ eq./m ³							
Parâmetro	A1 - A3	A4	B4	C2	C3	C4	D
Fibra de madeira	-5.72E+01	4.24E+00	3.57E+01	3.38E-01	7.28E+01	5.21E-01	-1.18E+01
Chapa de aço	2.11E+01	9.01E-01	0.00E+00	6.63E-02	0.00E+00	2.55E-02	-1.32E+01
Painel 2	-3.61E+01	5.14E+00	3.57E+01	4.04E-01	7.28E+01	5.46E-01	-2.49E+01

A partir do Quadro 3.2.2, é possível agrupar os valores de cada fase para o Painel 2 em estudo. Esses valores são apresentados de seguida, em percentagem.

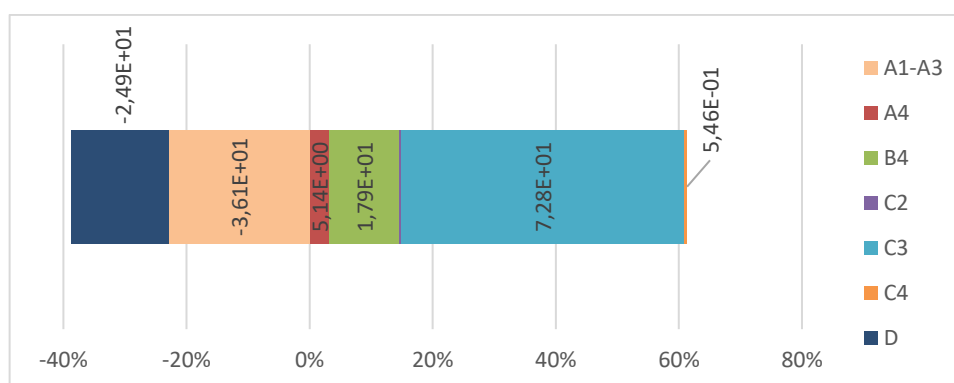


Figura 3.2.8 - Pegada de carbono para o Painel 2, em percentagem.

iv. Discussão

A partir dos cenários mencionados para o painel de isolamento de fibra de madeira (Painel 2) foi possível obter, tanto o diagrama de entradas e saídas dos fluxos, como os valores da análise de ciclo de vida.

Com base nos resultados fornecidos pelo Quadro 3.2.2 é possível concluir que a fibra de madeira apresenta alguns valores negativos no potencial de aquecimento global, que correspondem a um benefício. Na etapa de extração (A1-A3), a fibra de madeira tem um valor de $-5.72E+01$ kg CO₂ eq., enquanto que a chapa de aço apresenta um valor positivo. Isso sugere que a produção de fibra de madeira resulta numa menor emissão de gases com efeito de estufa comparativamente com a chapa de aço. Os valores negativos de GWP indicam um impacto ambiental favorável (benefício). Este benefício resulta do sequestro de carbono durante o crescimento das árvores, o que implica que a fibra de madeira tem o potencial de contribuir para a redução das emissões de gases com efeito de estufa. Assim, a fibra de madeira é a escolha mais ecológica nesta etapa.

Por outro lado, para a etapa A4, que representa o transporte entre a extração da matéria-prima e o local de construção do painel, a fibra de madeira apresenta um valor de GWP de $4.24E+00$ kg CO₂ eq. , enquanto a chapa de aço apresenta um valor inferior. Embora a fibra de madeira tenha um valor de GWP mais elevado nesta etapa, é importante considerar o impacto geral do ciclo de vida onde a fibra de madeira demonstra uma contribuição ambiental positiva. No entanto, o valor da etapa A4 é significativamente menor que o impacto observado na etapa da extração, o que se leva a concluir que a fibra de madeira continua a ser uma escolha favorável quanto à pegada de carbono.

A etapa B4 traduz a substituição do material ao longo da vida útil em estudo. Tendo em consideração que a chapa de aço não necessita de ser substituída o longo dos 50 anos e que a fibra de madeira necessita de ser substituída de 10 em 10 anos, nesta etapa a fibra de madeira conduz a um maior impacto ambiental.

Ao avaliar o Painel 2, que combina a chapa de aço e a fibra de madeira, é fundamental considerar o impacto cumulativo de ambos os materiais. Na etapa de produção, o painel apresenta um valor negativo, indicando um impacto ambiental positivo durante esta fase. Isso sugere que a combinação dos dois materiais resulta em emissões de gases de efeito de estufa significativamente menores em comparação com os materiais individuais. Nas etapas de fim de vida, C2 e C4, o Painel 2 mantém um desempenho ambiental favorável, com valores semelhantes aos da fibra de madeira. Isso implica que o transporte e eliminação final do painel no fim de vida, tenha um impacto ambiental relativamente menor, contribuindo para um ciclo

de vida mais sustentável. A etapa D apresenta um valor de $-2.49E+01$ kg CO₂ eq., o que significa que se trata de uma redução substancial nos impactos em geral para este painel.

A partir do gráfico presente na Figura 3.2.8, é possível observar que tanto as fases A1-A3 e D do Painel 2 são negativas, o que corresponde ao sequestro de carbono na fase de produção (A1-A3) e à recuperação de energia no módulo D.

3.3 Conclusões

Com base nos resultados evidenciados na análise de ciclo de vida realizada para os materiais de lã de rocha, fibra de madeira, chapa de aço e os respectivos painéis de isolamento, fica evidente que esses materiais têm impactos ambientais variados ao longo do seu ciclo de vida. A avaliação centrou-se principalmente no indicador de aquecimento global, considerando as diferentes fases do ciclo de vida, nomeadamente a extração de matéria-prima, o transporte, a substituição e o fim de vida.

Com os resultados obtidos neste capítulo, é possível agrupar os dados da pegada de carbono referentes a cada material no Painel 1 e no Painel 2 presentes no Quadro 3.3.1.

Quadro 3.3.1 - Dados relativos à pegada de carbono para cada material, em kg CO₂ eq/m³.

	Lã de rocha	Fibra de madeira	Chapa de aço	Total
Painel 1	4.49E+00	0.00E+00	8.93E+00	1.34E+01
Painel 2	0.00E+00	4.47E+01	8.93E+00	5.36E+01

A lã de rocha demonstrou impactos ambientais moderados durante a extração da matéria-prima, conforme é possível visualizar nos resultados obtidos. No entanto, o impacto ambiental geral foi relativamente baixo durante o transporte e o fim de vida.

Por outro lado, a fibra de madeira exibiu valores de GWP negativos durante a fase de produção, uma vez que a madeira captura CO₂, destacando dessa forma as suas características ecológicas. No entanto, na fase de fim de vida, parte do CO₂ sequestrado é libertado pelo que o balanço final não é assim tão benéfico. Além disso, e como tem apenas uma vida útil de 10 anos, a sua substituição ao longo dos 50 anos, agrava o seu desempenho ambiental nos 50 anos considerados para a análise.

Embora a fibra de madeira tenha apresentado impactos ambientais relativamente menores durante parte do seu ciclo, esta não superou o desempenho positivo da lã de rocha. A chapa de

aço, por outro lado, apresentou impactos ambientais negativos durante a produção e menores impactos nas etapas seguintes, tornando-a menos desejável do ponto de vista ambiental. É de notar que a limitação deste estudo e dos resultados deriva da limitação de estudos publicados.

Em conclusão, com base nos resultados oferecidos pela ACV, os painéis de isolamento com lã de rocha oferecem um melhor desempenho ambiental entre o outro material analisado.

No entanto, os valores negativos de GWP durante a etapa de produção das fibras de madeira (módulos A1-A3), indicam que a fibra de madeira demonstra um desempenho ambiental promissor e pode contribuir para uma indústria de construção mais sustentável.

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS PAINÉIS

Neste quarto capítulo serão analisados os resultados experimentais desenvolvidos para o estudo do comportamento estrutural dos dois tipos de painéis de isolamento: o de lã de rocha e o de fibra de madeira. Esta campanha experimental foi realizada no laboratório do Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE) situado no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, no âmbito do projeto INCSEB.

Refere-se mais uma vez que neste trabalho não se pretendem tirar conclusões do ponto de vista estrutural dos diversos painéis, mas apenas proceder-se à comparação entre dois métodos distintos de obtenção de deslocamentos. O comportamento estrutural dos painéis não faz parte do âmbito desta dissertação

4.1 Introdução

O comportamento estrutural dos painéis de isolamento é considerado um fator relevante para avaliar o seu desempenho ao longo do tempo. Para tal, a Correlação de Imagem Digital (DIC) e as técnicas de medição padrão, são métodos utilizados no estudo do deslocamento dos painéis de isolamento, ambas tendo vantagens e desvantagens.

O equipamento de medição de deslocamentos padrão a ser analisado, é o Transformador Diferencial de Variável Linear (LVDT), ou seja, um defletómetro. Um LVDT caracteriza-se por ser uma medida física e tem a particularidade de ser um transdutor de deslocamento, que converte uma posição de referência, num sinal elétrico (De Pelegrin et al., 2017). Os LVDTs são largamente reconhecidos e amplamente utilizados como uma técnica ancestral no campo da engenharia, em virtude da sua preferência excepcional (Joshi, 2017).

O LVDT apresenta algumas vantagens, como possuir uma elevada precisão (De Pelegrin et al., 2017) e uma resolução, igualmente elevada (Joshi, 2017). Por outro lado, o LVDT apresenta algumas limitações, uma vez que, as medições entre dois pontos específicos, restringem a sua capacidade na captura de deformações ou de variações, para além desses pontos definidos (Skarlatos D, Yiatros S ; 2016), em qualquer campo de deslocamento (Joshi, 2017). Mais do que esta desvantagem, a medição, por si, requer uma grande quantidade de instrumentos LVDT; é um processo demorado, sobretudo em painéis de grandes dimensões; tendo em consideração a alta precisão deste equipamento que está sujeita à habilidade e à experiência da pessoa

encarregue de executar a instrumentação dos painéis; os LVDTs fornecem resultados discretos uma vez que a sua medição é baseada em pontos e nos seus eixos, e não tem em consideração o campo em estudo completo (Instruments, 2017).

Por outro lado, com a revolução da tecnologia informática, foi possível começar a desenvolver várias aplicações na área da imagem 3D, tal como a Correlação de Imagem Digital (DIC) (Salunkhe et al., 2022). O DIC destaca-se por ser um método de medição ótico, que não requer de contacto físico direto. Baseia-se fundamentalmente na análise de imagens para a partir daí, examinar a deformação e o deslocamento do corpo de prova analisado. Esse comportamento pode ser vantajoso, em situações que se mostra eficiente em termos de tempo e menos trabalhoso. Em simultâneo, apresenta resultados precisos e imagens de alta resolução (Bigger et al., 2018; Martins et al., 2022; Pan, 2018).

O DIC é vantajoso, uma vez que consegue adaptar-se a diversas estruturas, com limitações em estruturas de grandes dimensões; analisa os deslocamentos e as deformações sem contacto físico direto com a estrutura (Salunkhe et al., 2022); apresenta uma elevada precisão; a aquisição dos dados é conseguida em tempo real (Pan & Li, 2011) e caracteriza-se por ser uma técnica que não é destrutiva nem invasiva (Speranzini & Agnetti, 2014). O DIC apresenta desvantagens como um elevado custo (Pan & Li, 2011) e a impossibilidade de realizar os ensaios fora do laboratório devido aos seguintes fatores: aos efeitos do ambiente; às mudanças de temperatura; à possível dificuldade de acesso ao local e às mudanças das condições da superfície (Ramos et al., 2015).

Com a finalidade de iniciar o estudo do comportamento experimental, foram realizados quatro testes experimentais com controlo de deslocamento: o ensaio nº1 que remete ao painel da lã de rocha e os ensaios nº2, nº3 e nº4 que pertencem aos ensaios dos painéis de fibra de madeira.

Com estes ensaios, pretendeu-se analisar dois aspetos: se a correlação de imagem digital fornece dados semelhantes aos LVDT's, considerando o DIC na escolha futura mais eficiente e chegando assim, aos resultados mencionados por (Martins et al., 2022; Ramos et al., 2015); se a correlação de imagem digital consegue medir os deslocamentos quando se trata de um layout de grandes dimensões.

4.2 Instrumentação dos painéis

4.2.1 Medição dos deslocamentos com DIC no estudo de painéis de isolamento

O princípio subjacente do DIC gira em torno da identificação e análise de vários pontos na superfície, através de uma sucessiva captura de imagens. Antes de aplicar a carga, é necessário

capturar uma imagem de referência. Subsequentemente, as imagens adquiridas sob carga exibem deformação característica (Speranzini & Agnetti, 2014). A reconstrução de campos de deformação superficial envolve a análise de pontos de amostragem na superfície do painel, permitindo a determinação de deslocamentos e posteriormente determina as deformações correspondentes (Martins et al., 2022).

i. Carga aplicada

O atuador hidráulico, na qual se encontra acoplado à célula de carga, é o mecanismo que vai impor deslocamento ao layout do ensaio, como é demonstrado na Figura 4.2.1. Após o layout experimental estar devidamente posicionado, procede-se à preparação da superfície do painel, sendo necessário ser limpa e preparada para o teste. Assim que todo o material esteja devidamente preparado, inicia-se a instrumentação e posteriormente, aplica-se a carga com a ajuda do atuador hidráulico.

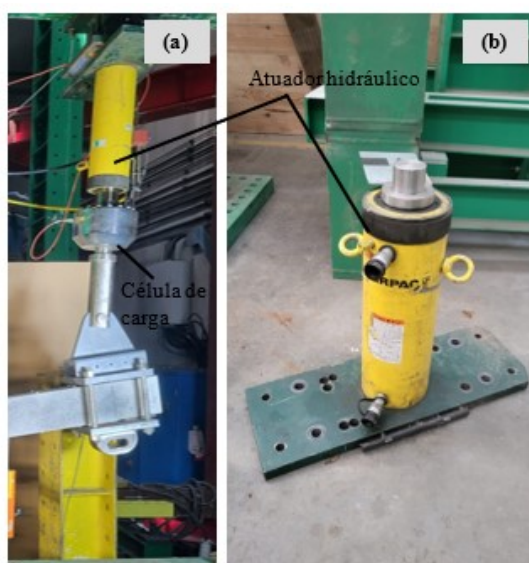


Figura 4.2.1 - (a) Fotografia do atuador hidráulico com célula de carga; **(b)** Fotografia real do atuador hidráulico.

A aplicação da carga no painel pelo atuador é realizada a partir do controlo de deslocamento, segundo alguns intervalos de deslocamento, a carga é aplicada segundo diversas velocidades em cada intervalo de tempo, como estão demonstradas na Figura 4.2.2. Esta velocidade de carga vai ser partilhada nos quatro ensaios realizados e foi calculada com o propósito de obter um ensaio quase estático com ciclos de inversão de carga, pretendendo-se que os ciclos fossem inferiores a 30 minutos e que o ensaio experimental tivesse uma duração total inferior a 5 horas.

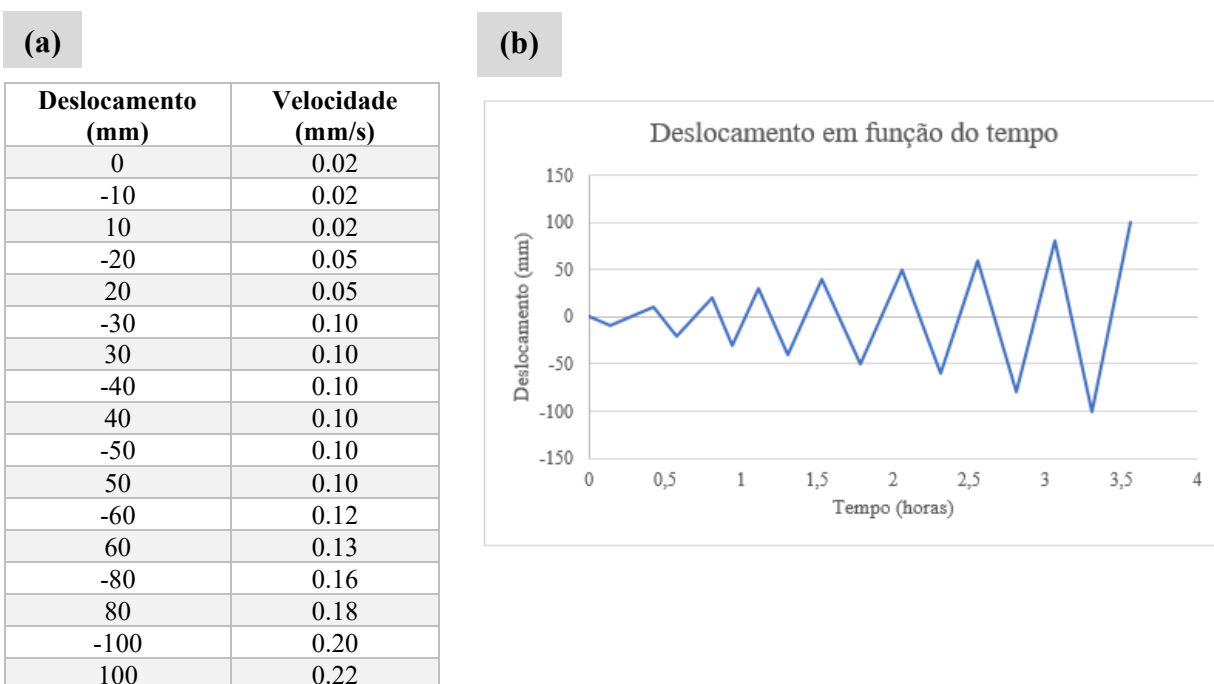


Figura 4.2.2 - (a) Quadro com os valores do deslocamento e da velocidade; **(b)** Gráfico com as velocidades de carga ao longo do tempo (José Heitor Soares, relatório interno, 2023).

ii. Câmaras

A correlação de imagem digital produz imagens por meio de dois processos distintos: 2D-DIC e 3D-DIC. Embora os princípios subjacentes sejam semelhantes, eles diferem nos requisitos dos seus equipamentos. O processo 2D-DIC envolve o uso de uma única câmara e pressupõe que a amostra de teste seja plana, enquanto que o 3D-DIC requer um mínimo de duas câmaras e é altamente recomendado para testes abrangentes (Bigger et al., 2018). Os quatro ensaios que serão desenvolvidos, foram analisados por meio de duas câmaras, o que significa que o processo usado foi 3D-DIC.

As câmaras usadas nos testes experimentais estavam suspensas e presas a uma barra de montagem, posicionadas à máxima distância entre elas permitida, de 1,40m, conforme é demonstrado na Figura 4.2.3. A calibração é um aspeto fundamental quando se recorre ao DIC, uma vez que as câmaras precisam de seguir alguns requisitos, de modo a obter-se resultados fidedignos, como: a distância entre as câmaras; a distância entre a câmara e o objeto em estudo; o ângulo entre as câmaras. Após a devida calibração, o equipamento deve-se manter imóvel.

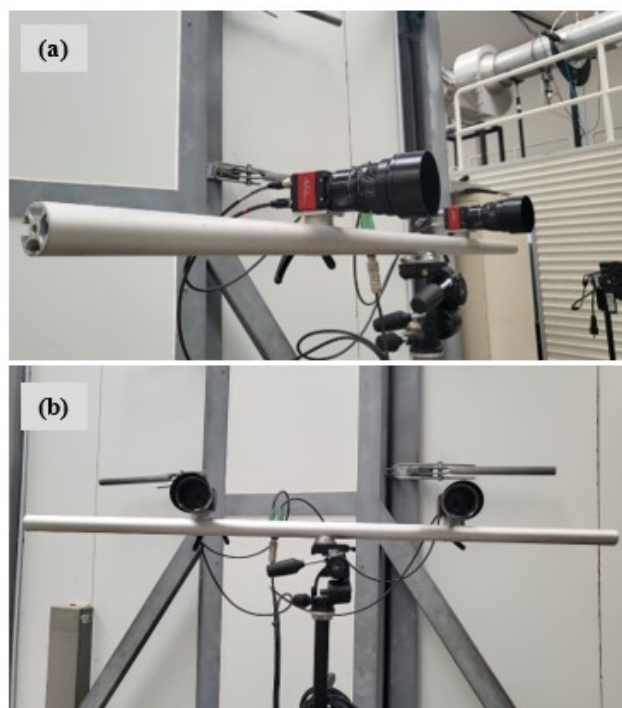


Figura 4.2.3 - (a) e (b) Fotografia das câmaras usadas nos testes experimentais, com máxima distância.

A Figura 4.2.4 pretende demonstrar o posicionamento das câmaras nos quatro ensaios experimentais, sendo que estavam afastadas pelo limite máximo possível. As duas câmaras tinham uma taxa de aquisição de 1Hz, o que significava que em cada segundo, tiravam uma fotografia.

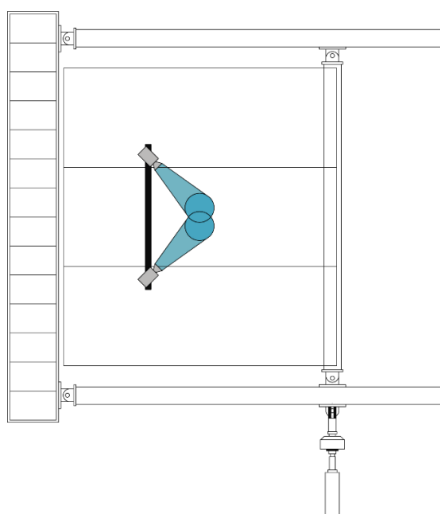


Figura 4.2.4 - Esboço do correto posicionamento das duas câmaras nos ensaios experimentais (Alterado de: Pan, 2018; José Heitor Soares, relatório interno, 2023).

iii. Computador e software

Existe uma gama variada ao nível do software, desenvolvida no sentido de efetuar a correlação de imagem digital. No entanto, há duas que são mais utilizadas, uma refere-se ao método DIC local e a outra ao método DIC global. Relativamente ao método DIC local, a solução de coordenadas em relação a um ponto, depende de um pequeno subconjunto da imagem na proximidade desse ponto, sendo, no entanto independente da solução, em relação aos outros pontos de interesse. No método DIC global, a solução do ponto de interesse está dependente dos outros pontos à sua volta (Bigger et al., 2018), o que faz com que este seja o método pretendido, ao longo dos ensaios laboratoriais. Os ensaios experimentais deste estudo foram realizados segundo o método DIC global.

A correlação de imagem digital necessita de um computador e de um software, como é demonstrado na Figura 4.2.5 (a). Esses equipamentos permitem a aquisição e o armazenamento dos dados adquiridos ao longo do ensaio experimental; a execução da correlação e a visualização dos resultados por meio de imagens, de vídeos ou de gráficos (Instruments, 2017). O software usado nestes ensaios experimentais eram da marca DANTEC DYNAMICS, uma vez que apresenta alguns benefícios como: pontos de interesse ilimitados; a medição em qualquer tipo de superfície; a configuração e a calibração são rápidas e fáceis (Instruments N, 2017).

iv. Padrão estocástico

Para a utilização do equipamento da correlação de imagem digital, é preciso que a superfície do corpo de prova seja limpa e pintada de forma homogénea e posteriormente seja criado um padrão estocástico de pontos que são registados pelas câmaras. O padrão estocástico necessita de uma tinta colorida simples, à base de água, ao ser aplicado nas superfícies, que após a resolução do ensaio laboratorial (Speranzini & Agnetti, 2014), permite ser removida a partir do momento em que a amostra em estudo não apresente alguma textura em estado natural. A tinta em questão gera padrões de manchas pretas em fundo branco, de forma aleatória (Pan, 2018; Yuan et al., 2020), como se mostra disponível na Figura 4.2.5 (b). Tanto a tinta preta como o fundo branco devem ser opacos de modo a não refletirem a luz.

O padrão estocástico influencia diretamente, ao nível da precisão e da exatidão, os deslocamentos detetados pelo DIC. Assim, para que o seu funcionamento seja eficaz, torna-se necessário promover um padrão de qualidade, que deve considerar os requisitos, como:

- Alto contraste: contraste, intensidades de tons de cinza e intensidades variáveis;

- Aleatoriedade: padrão único, jamais contínuo, para assim promover o preenchimento do deslocamento em campo completo;
- Estabilidade: padrão com aderência à superfície de forma consistente, deformando-se sobre ela (McCormick & Lord, 2010; Pan, 2018).

A exatidão e a credibilidade dos resultados ao nível do DIC dependem principalmente, da calibração rigorosa do equipamento; da qualidade do padrão estocástico e do controlo apropriado das condições de iluminação (Martins et al., 2022). É importante que a luz seja constante para que a captura das imagens seja igualmente constante. Por esse motivo, usa-se iluminação artificial que permite ser móvel e criar uma iluminação constante a longo do tempo.

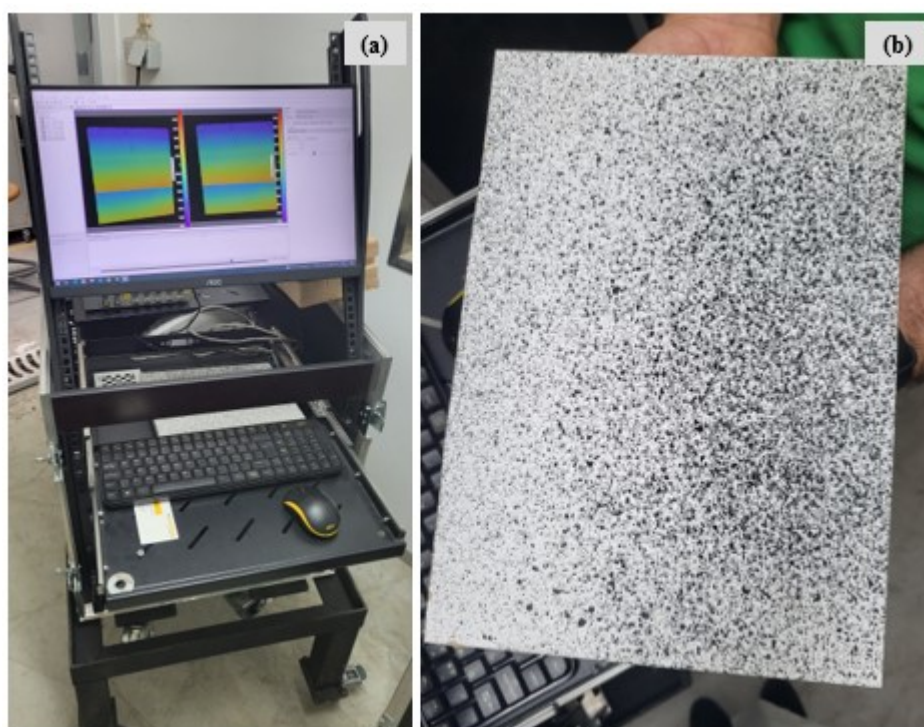


Figura 4.2.5 - (a) Computador e respetivo software usado nos testes experimentais; **(b)** Padrão estocástico de qualidade.

v. Metodologia

Como referido anteriormente, os resultados esperados, a partir da correlação de imagem digital podem ser obtidos por meio de imagens, de vídeos ou de gráficos, uma vez que são expressos de acordo com os eixos X, Y e Z. A Figura 4.2.6 (a), (b) e (c) confirma os resultados, por meio de imagens, dos eixos X, Y e Z, respetivamente. É possível observar, os painéis apresentados, em relação aos ensaios dos painéis de isolamento de fibra de madeira. No entanto, é de salientar

que as imagens obtidas seriam idênticas, quando aplicadas nos restantes painéis. No estudo em questão, salienta-se a importância do eixo Y e os resultados obtidos, baseados nos gráficos em questão.

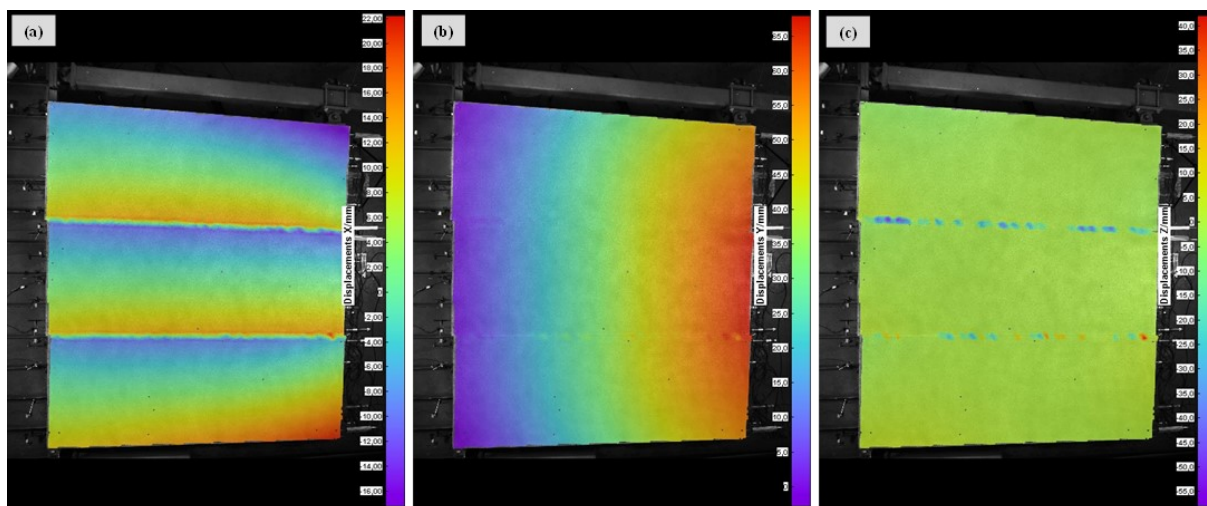


Figura 4.2.6 - (a) Deslocamento do painel segundo a direção X; **(b)** Deslocamento do painel segundo direção Y; **(c)** Deslocamento do painel segundo direção Z

A Figura 4.2.6 representa as imagens conclusivas do deslocamento, através da planta. Com base nisso, considera-se que os eixos X, Y e Z estão representados de acordo com a Figura 4.2.7.

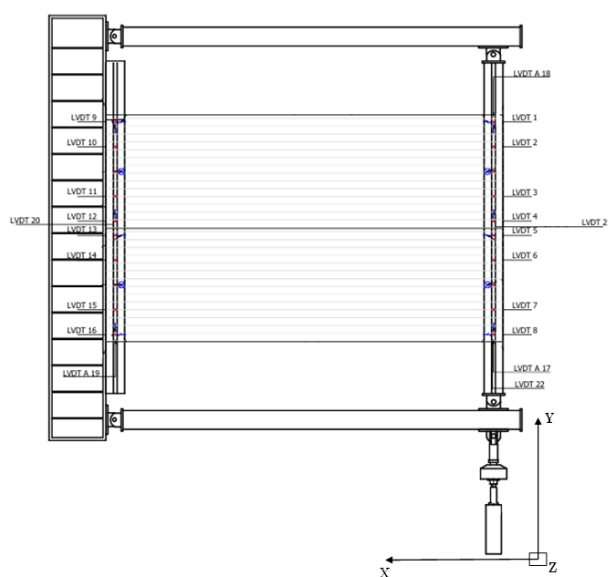


Figura 4.2.7 - Representação esquemática dos eixos X, Y e Z, em perspectiva plana.

Ao longo do estudo do deslocamento dos quatro ensaios dos painéis, foi considerada a existência de quatro pontos: o ponto A, o ponto B, o ponto C e o ponto D para os ensaios nº1, nº2, nº3, nº4, respetivamente.

Com estes ensaios pretendeu-se avaliar o comportamento do sistema com o deslocamento sofrido pelos painéis. A Figura 4.2.8 demonstra a possibilidade do deslocamento esperado, da qual, foi testemunhada. Os restantes painéis, terão este tipo de comportamento. Este comportamento é referido apenas neste ponto, evitando assim repetições, ao longo da dissertação.

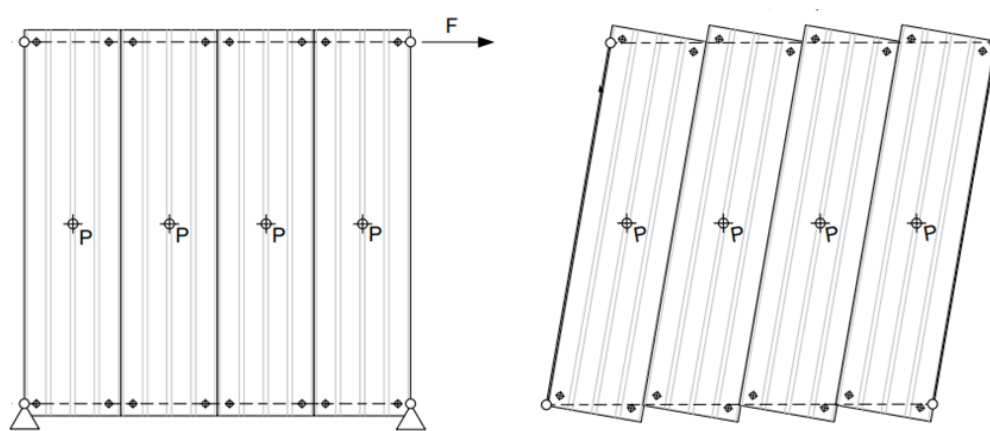


Figura 4.2.8 - Comportamento esperado e observado ao nível dos quatro ensaios experimentais (Käpplein et al., 2011).

vi. Painel de isolamento de lã de rocha

Em relação ao painel de isolamento de lã de rocha foi avaliado um único ensaio (ensaio nº1), uma vez que o objetivo principal foi antecipar a respetiva posição do layout em estudo, para que posteriormente se pudesse realizar os ensaios nº2, nº3 e nº4.

O layout em estudo caracterizou-se por ter dois painéis em forma de sandwich, sendo compostos por duas chapas de aço em que, entre elas, se encontra a espuma de lã de rocha. Cada um dos painéis possui 1,180 m de largura, por 4 m de vão, perfazendo assim, um comprimento linear de 4,20 m. Cada uma das chapas de aço, tem de espessura 0,005 m enquanto que a espuma de lã de rocha apresenta uma espessura de 0,01 m.

Neste ensaio serão analisados os resultados oferecidos pelo LVDT A17 e pelo deslocamento na direção Y do ponto A. A Figura 4.2.14 apresentada mais à frente, mostra o posicionamento dos LVDT's nos painéis de isolamento. A partir do LVDT A17 foi possível controlar o

deslocamento do sistema durante o ensaio, tendo sido adequado para o estudo. A figura apresentada, esquematiza a disposição do ponto A, que se situa próximo ao centro do conjunto dos painéis.

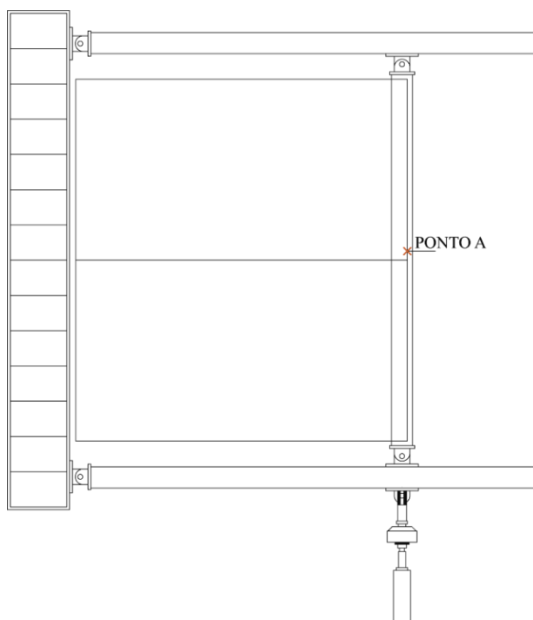


Figura 4.2.9 - Posição do ponto A nos painéis de isolamento de lâ de rocha (Alterado de: José Heitor Soares, relatório interno, 2023).

vii. Painel de isolamento de fibra de madeira

Para os painéis de isolamento de fibra de madeira foram realizados três ensaios: o ensaio nº2, o ensaio nº3 e o ensaio nº4. Em todos os ensaios, o layout consistia em três painéis de isolamento de fibra de madeira, em forma de sandwich com duas estruturas de chapa de aço e entre elas uma camada de espuma de fibra de madeira. Todos os painéis tinham 1,130 m de largura e 3 m de comprimento de vão, representando um total de 3,10 m de comprimento. Cada chapa de aço apresenta uma espessura de 0,005 m enquanto que a espuma de fibra de madeira apresenta uma espessura de 0,2 m.

A instrumentação aplicada a estes painéis é similar ao descrito anteriormente. Sendo assim, é composto por duas câmaras que vão fazendo o registo fotográfico, à medida que a deslocação de processa. Neste ensaio são analisados os resultados disponibilizados pelo LVDT A25 e pelos deslocamentos na direção Y dos pontos B, C e D registado pela correlação de imagem digital para os ensaios nº2, nº3 e nº4, respetivamente. Estes deslocamentos são relacionados ao deslocamento em Y na direção do LVDT A25, que se encontra posicionado perto do centro do

eixo, sendo por isso a opção adequada para se proceder à análise. O posicionamento do LVDT A25 é identificado pela Figura 4.2.15, que é apresentada mais à frente.

Através do LVDT A25 foi possível controlar o deslocamento do sistema durante o ensaio, tendo sido assim, o mais adequado para proceder a este estudo. A Figura 4.2.10, a Figura 4.2.11 e a Figura 4.2.12 mostram o esquema em relação à posição do ponto B, C e D, respetivamente.

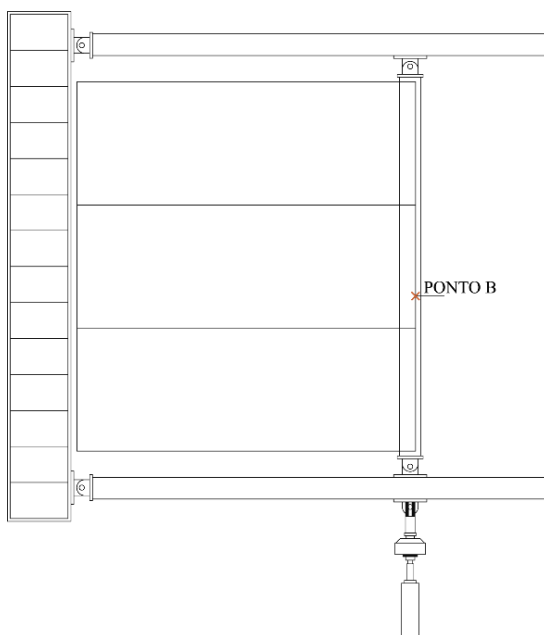


Figura 4.2.10 - Posição do ponto B nos painéis de isolamento de fibra de madeira (José Heitor Soares, relatório interno, 2023).

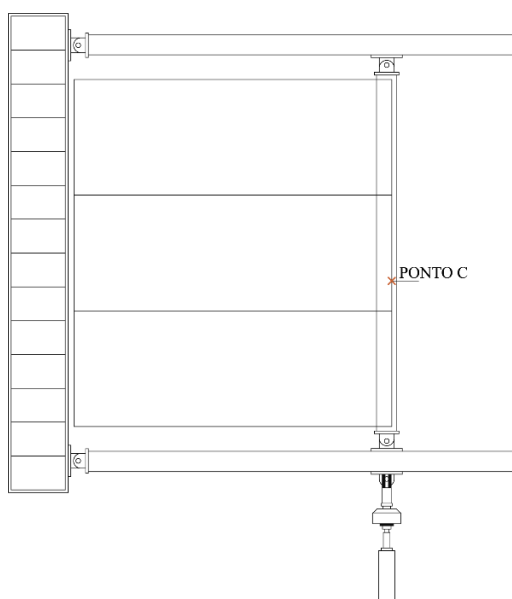


Figura 4.2.11 - Posição do ponto C nos painéis de isolamento de fibra de madeira (José Heitor Soares, relatório interno, 2023).

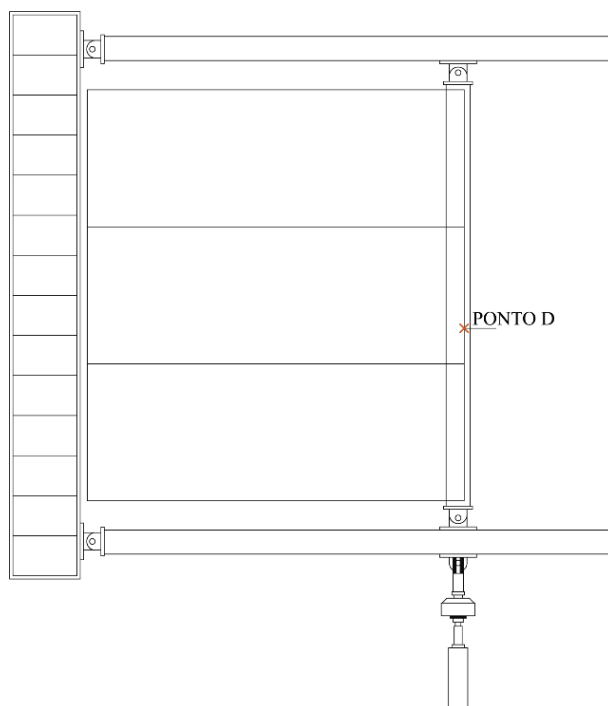


Figura 4.2.12 - Posição do ponto D nos painéis de isolamento de fibra de madeira (José Heitor Soares, relatório interno, 2023).

4.2.2 Medição dos deslocamentos com LVDT no estudo de painéis de isolamento

Existem várias técnicas de medição padrão, mas como foi mencionado, apenas uma foi estudada na campanha experimental desta dissertação: os Transformadores Diferencial de Variável Linear (LVDT).

Como já foi referido, os LVDT's são dispositivos usados para medir os deslocamentos de um material sob uma determinada carga. Para tal, para os quatro ensaios, foram instrumentados dois tipos de LVDTs: o LVDT a laser sem contacto, representados na Figura 4.2.13(a) e o LVDT TML representados na Figura 4.2.13(b). A diferença entre estes dois instrumentos, baseia-se no facto de o LVDT a laser obter os dados do deslocamento a partir do tempo que o feixe de luz demora a ser emitido e que é refletido posteriormente. Este tipo de LVDT a laser é mais preciso que o LVDT TML, no entanto, como ambos são instrumentos de contacto direto com os painéis, em ensaios destrutivos, pode surgir o risco, de os LVDTs ficarem também destruídos.

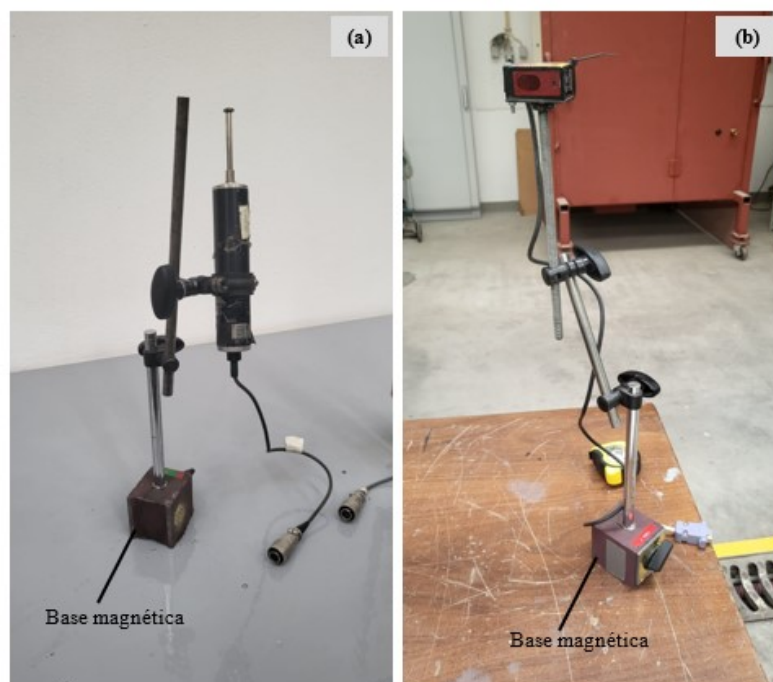


Figura 4.2.13 - (a) Fotografia real do LVDT TML; **(b)** Fotografia real do LVDT a laser

Este método requer competência na instrumentação com os LVDT's e como tal, envolve algumas etapas. Após o layout experimental estar devidamente posicionado, procede-se de igual forma, à preparação da superfície do painel, pelo que é necessário que seja limpa e preparada para o teste. A segunda etapa envolve a fixação do extensómetro num respetivo ponto da superfície e fixado. Assim que todo o material esteja devidamente preparado, inicia-se a instrumentação dos LVDT's e posteriormente, aplica-se a carga com o atuador hidráulico.

i. Painel de isolamento de lã de rocha

O ensaio nº1 referente ao painel de isolamento de lã de rocha já foi descrito anteriormente, neste capítulo, caracterizando-se por ter as respetivas medidas: cada painel tem 1,180 m de largura por 4 m de vão, perfazendo assim, um comprimento de 4,20 m. Cada chapa de aço tem 0,0005 mm de espessura, enquanto que a espuma de lã de rocha apresenta uma espessura de 0,1 m. Neste ensaio pretende-se realizar as medidas a partir dos valores obtidos pelos LVDT's. Para tal, foram instrumentados 22 LVDT's, como mostra a figura seguinte.

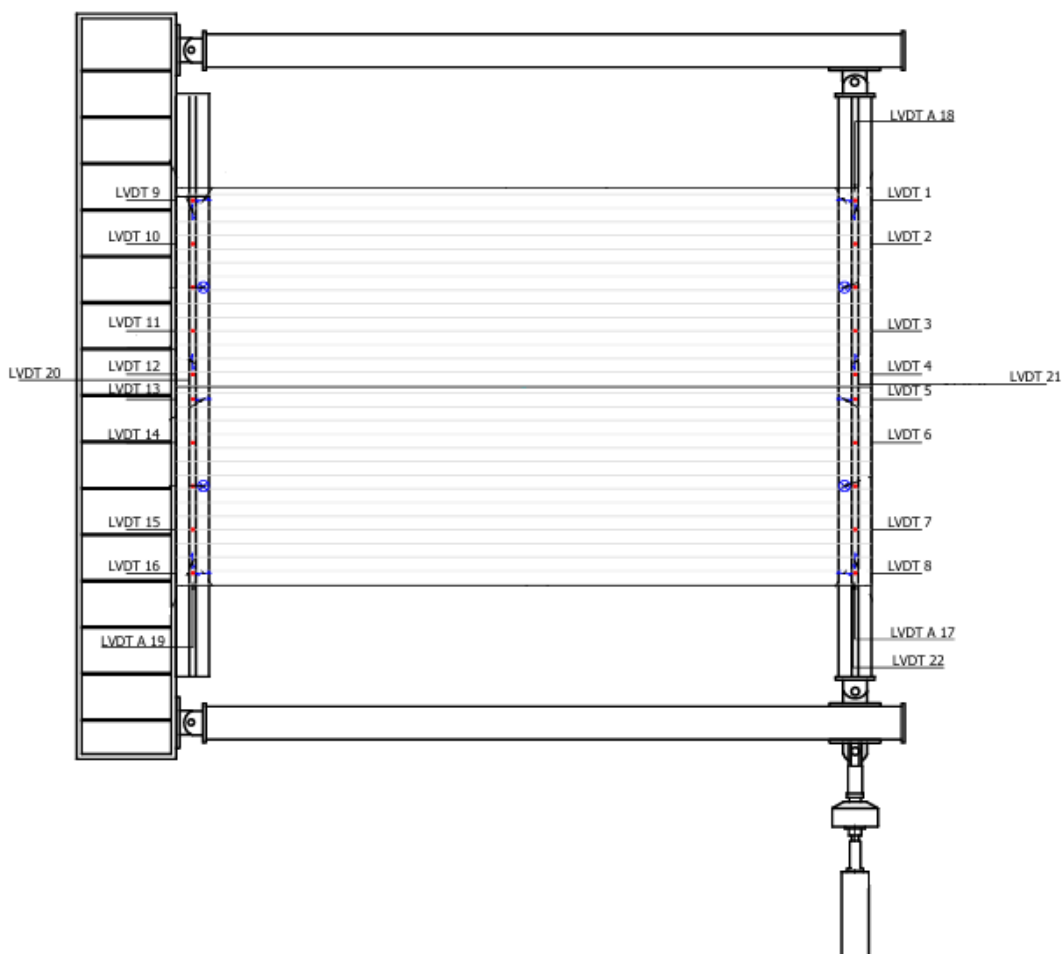


Figura 4.2.14 - Desenho com a instrumentação dos LVDT's do ensaio nº 1 (José Heitor Soares, relatório interno, 2023).

ii. Painel de isolamento de fibra de madeira

Os três ensaios subsequentes, nº2, nº3 e nº4, relativamente à fibra de madeira, foram da mesma forma já caracterizados anteriormente, uma vez que cada layout inclui três painéis com 1,130 m de largura e 3 m de vão, expressando num comprimento total de 3,10 m. As chapas de aço tinham uma espessura de 0,0005 mm cada uma e a espuma de fibra de madeira apresentava uma espessura de 0,2 m.

Os três ensaios foram instrumentados com 28 LVDT's, como é possível observar na Figura 4.2.15. A figura assinala a devida posição dos LVDT's para os três ensaios relativos aos painéis de isolamento de fibra de madeira.

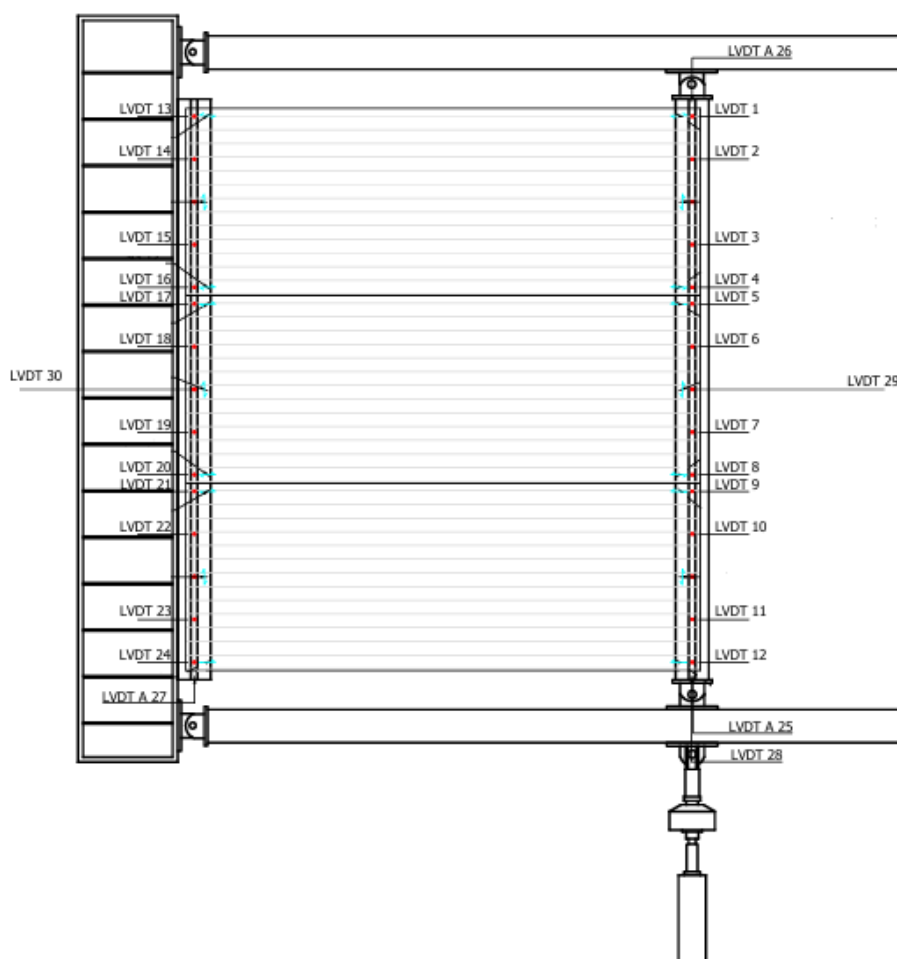


Figura 4.2.15 - Desenho com a instrumentação dos LVDT's do ensaio nº 2, nº3 e nº4 (José Heitor Soares, relatório interno, 2023).

4.3 Resultados

Com o objetivo de se proceder ao estudo do comportamento estrutural, referente aos painéis de isolamento, foram realizados quatro ensaios. O primeiro ensaio é relativo aos painéis de isolamento de lã de rocha e teve como objetivo avaliar o seu comportamento, assim como preparar o layout e o suporte para os ensaios da fibra de madeira. Em relação ao estudo sobre o comportamento dos painéis de fibra de madeira, foram realizados três ensaios laboratoriais. Desse modo, foi possível finalizar o seu estudo, ao comparar os resultados entre o LVDT e o DIC em cada painel e ainda, se foram obtidos os resultados esperados. Por outro lado, foi feita a comparação ao nível do comportamento entre os painéis de isolamento de lã de rocha e de fibra de madeira e o respetivo desvio relativo associado aos dois métodos para o deslocamento de cada ponto, segundo a direção Y.

Os resultados são obtidos através de um gráfico do deslocamento em função do tempo e de um quadro resumo que expressa o desvio relativo entre o LVDT e o deslocamento em Y registado pelo DIC. Os quadros Quadro 4.3.1, Quadro 4.3.2, Quadro 4.3.3, Quadro 4.3.4 mostram os valores do desvio para oito ciclos, considerando que o primeiro ciclo enquadra-se nos valores de deslocamento [-10,+10]; o segundo ciclo está no intervalo [-20,+20]; o terceiro ciclo encontra-se no intervalo [-30,+30]; o quarto ciclo no intervalo [-40,+40]; o quinto ciclo no intervalo [-50,+50]; o sexto ciclo pertence ao intervalo [-60,+60]; o sétimo ciclo está incluído no intervalo de deslocamento de [-80,+80] e o oitavo ciclo pertence ao intervalo [-100,+100].

4.3.1 Ensaio nº 1

O ensaio nº1 permite examinar o comportamento do painel de isolamento de lã de rocha sob condições específicas de velocidade de carregamento, com controlo de deslocamento. Como foi referido, foram empregues dois métodos distintos: a correlação de imagem digital (DIC) e os transformadores diferenciais de variável linear (LVDT).

Os resultados fornecidos foram agrupados segundo um gráfico e um quadro síntese. O gráfico de deslocamento gerado, representa o movimento do sistema de painéis ao longo do tempo. Como é possível observar na Figura 4.3.1, o gráfico apresenta um comportamento cíclico, mostrando múltiplos ciclos de deslocamento. Cada ciclo representa um movimento completo de uma posição inicial passando pelos extremos positivo e negativo e de volta à posição inicial, passando sempre pelo zero do referencial.

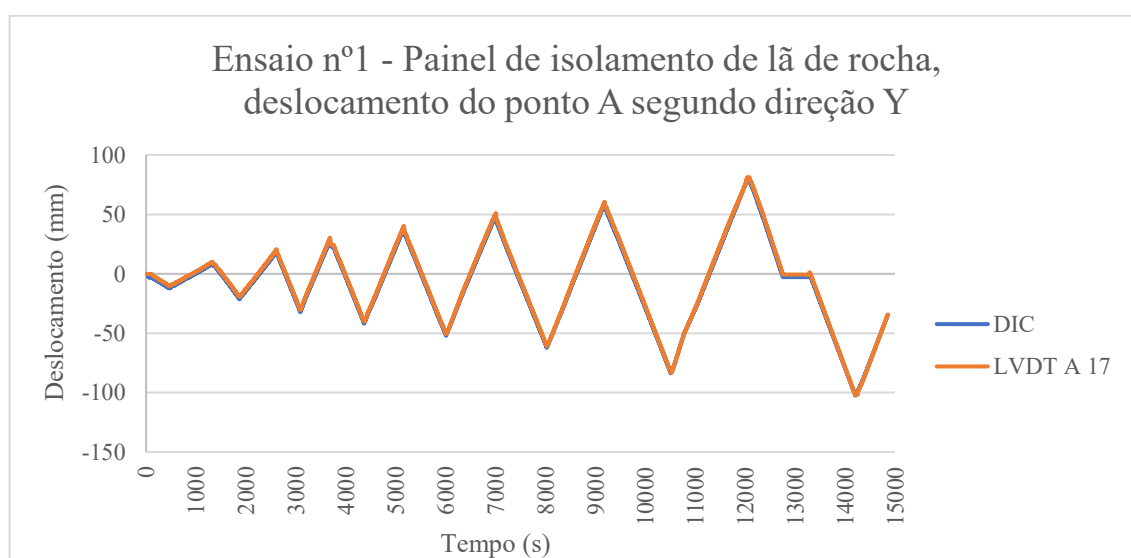


Figura 4.3.1 - Gráfico com os resultados do ensaio nº1 do painel de isolamento de lã de rocha, segundo direção Y.

Como é possível observar, os valores fornecidos pelo LVDT A17 e pelo DIC, apresentam o mesmo perfil de comportamento, mas com um desvio associado. O deslocamento máximo negativo que o ensaio nº1 para o LVDT A17 foi de -154,71 mm ao fim de 17808 segundos de ensaio e o máximo positivo foi de 151,59 mm ao fim de 18447 segundos. Para o DIC, o deslocamento máximo negativo foi de -151,42 mm ao fim de 17778 segundos e o máximo positivo obteve um valor de 152,54 mm ao fim de 18551 segundos.

Através destes dados é possível concluir que ao fim de 30 segundos de o DIC obter o deslocamento máximo negativo, o LVDT A17 apresenta o seu máximo negativo. Por outro lado, a diferença entre o deslocamento máximo positivo entre o LVDT A17 e o DIC é de 2 minutos.

O Quadro 4.3.1 pretende agrupar os dados com o desvio relativo entre o LVDT A17 e o ponto A.

Quadro 4.3.1 - Desvio relativo do deslocamento entre o LVDT A17 e o ponto A, na direção Y.

Δ do deslocamento entre o LVDT A17 e o ponto A, na direção Y		
Ciclo	Máximo negativo (mm)	Máximo positivo (mm)
1º ciclo	-2.58	-
2º ciclo	-2.05	-
3º ciclo	-2.08	-
4º ciclo	-2.18	-
5º ciclo	-2.49	-
6º ciclo	-2.87	-
7º ciclo	-2.28	0.63
8º ciclo	-2.27	2.62
Total ensaio nº 1	-3.28	2.62

Pelo quadro é possível visualizar que o ensaio nº1 apresenta um desvio máximo médio de 2,48 mm pelos ciclos oito ciclos, não sendo superior a 3.28mm.

4.3.2 Ensaio nº 2

O ensaio nº2 permite fazer uma análise do deslocamento dos painéis de isolamento de fibra de madeira. Como referido anteriormente, o layout é constituído por três painéis de isolamento. A análise envolveu a possibilidade de apresentar os resultados num gráfico do deslocamento em função do tempo, mostrando que os valores dos dois métodos têm o mesmo perfil de

comportamento para os primeiros ciclos de deslocamento, tendo um desvio acrescido constante para ciclos finais. O Gráfico apresentado na Figura 4.3.2 exibe um comportamento cíclico, com vários ciclos de deslocamento.

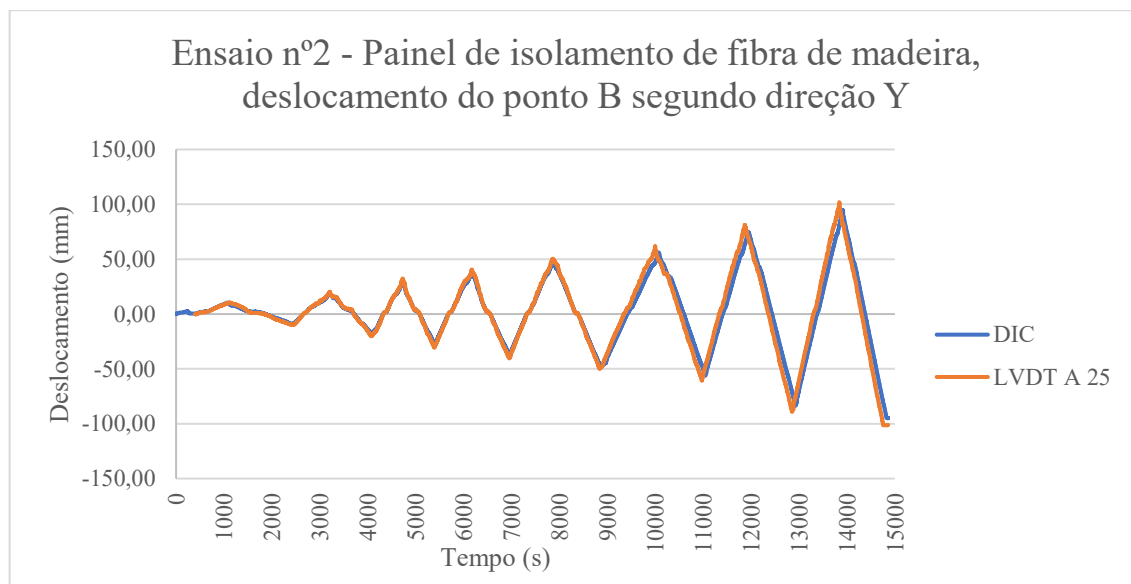


Figura 4.3.2 - Gráfico com os resultados do ensaio nº2 do pannel de isolamento de fibra de madeira, segundo direção Y.

A partir do gráfico apresentado anteriormente, é possível notar que os métodos DIC e LVDT A25 apresentam o mesmo perfil de comportamento até ao quinto ciclo, inclusive. A partir do sexto ciclo, é possível de visualizar que existe um desfasamento no perfil do comportamento entre os dois métodos. O gráfico demonstra que a diferença entre os deslocamentos calculado pelos dois métodos, é significativa. O LVDT A25 atinge o deslocamento máximo negativo ao fim de 16047 segundos do início do ensaio com um valor de -160,83 mm, enquanto que o deslocamento máximo positivo admite um valor de 156,62 mm ao fim de 15799 segundos. Por outro lado, o DIC obteve um deslocamento máximo negativo de -154,36 mm ao fim de 16047 segundos e o máximo positivo de 146,09 mm ao fim de 15766 segundos.

Após uma análise detalhada, é possível concluir que ao fim de 64 segundos (ou seja, um minuto) do LVDT A25 ter obtido o deslocamento máximo negativo, também o DIC atinge o seu máximo negativo. Por outro lado, a diferença entre o deslocamento máximo positivo entre o LVDT A25 e o DIC é de 33 segundos.

De modo a avaliar a precisão e a consistência dos métodos DIC e LVDT A25, foi possível construir um quadro com os valores resumidos deste ensaio. Este quadro pretende quantificar os desvios relativos máximos e mínimos entre cada método, observados em cada ciclo.

Quadro 4.3.2 - Desvio relativo do deslocamento entre o LVDT A25 e o ponto B, na direção Y.

Δ do deslocamento entre o LVDT A 25 e o ponto B, na direção Y		
Ciclo	Máximo negativo (mm)	Máximo positivo (mm)
1º ciclo	-1.96	1.18
2º ciclo	-1.82	1.47
3º ciclo	-3.60	2.50
4º ciclo	-3.50	3.07
5º ciclo	-4.27	3.76
6º ciclo	-14.75	10.09
7º ciclo	-18.17	13.74
8º ciclo	-20.98	18.37
Total ensaio nº 2	-20.98	18.37

Pelo Quadro 4.3.2 é possível visualizar que o ensaio nº2 apresenta um desvio máximo médio de 8,63 mm pelos oito ciclos, não sendo superior a 20,98 mm. É igualmente possível de confirmar os resultados visualizados no gráfico da Figura 4.3.2, sendo que o desvio máximo positivo e máximo negativo entre os dois métodos é mínimo até ao quinto ciclo. Após o sexto ciclo, há uma subida significativa do desvio entre os dois métodos ao longo do sétimo e oitavo ciclo.

4.3.3 Ensaio nº 3

No ensaio nº3, foi possível realizar uma análise abrangente do deslocamento dos três painéis de isolamento de fibra de madeira, aplicando as duas técnicas de medição distintas: a correlação de imagem digital (DIC) e os transformadores diferenciais de variável linear (LVDT). O objetivo com este ensaio foi entender o comportamento dos painéis em condições específicas e com controlo de deslocamento, de modo a comparar os resultados obtidos pelos dois métodos. A análise permite que seja apresentado um gráfico de deslocamento em função do tempo e que os desvios relativos máximos e mínimos de cada ciclo, sejam avaliados.

A partir dos dados obtidos durante o ensaio nº3, foi possível gerar o gráfico da Figura 4.3.3 que mostra padrões de movimento dos painéis ao longo do tempo.

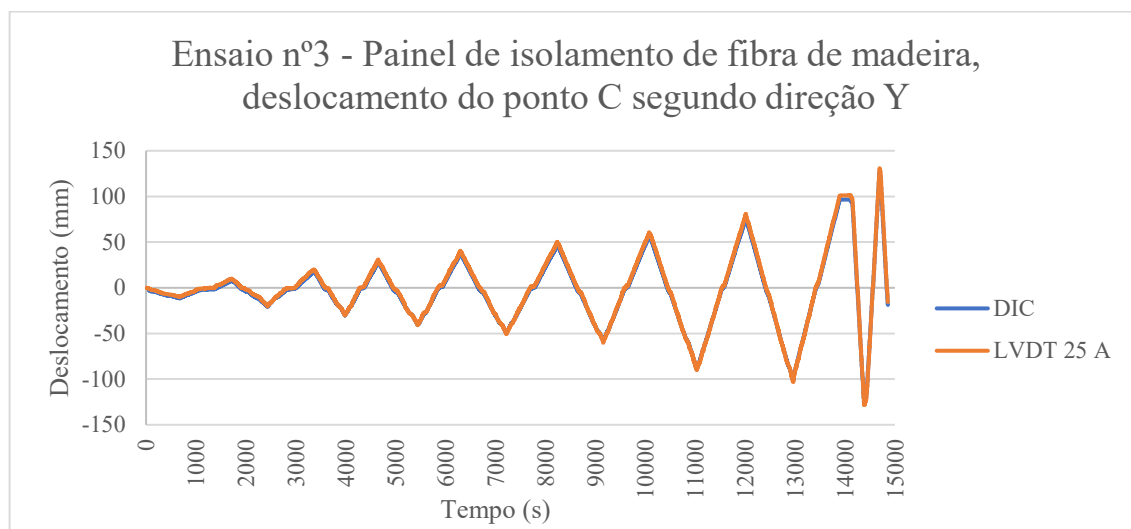


Figura 4.3.3 - Gráfico com os resultados do ensaio nº3 do pannel de isolamento de fibra de madeira, segundo direção Y.

É possível observar que os resultados dos dois métodos apresentam um perfil de comportamento semelhante, mostrando que os dois métodos fornecem resultados similares, ao longo de todos os ciclos. O LVDT A25 apresenta um deslocamento máximo negativo de -156,32 mm ao fim de 14996 segundos e o máximo positivo ao fim de 15472 segundos desde o início do ensaio., com um valor de 164,32 mm. Por outro lado, o DIC atingiu o deslocamento máximo negativo de -151,82 mm ao fim de 14995 segundos e um máximo positivo de 158,84 mm ao fim de 15471 segundos. Com os dados analisados, concluiu-se que o intervalo de tempo entre os deslocamentos máximos negativos entre o LVDT A25 e o DIC é de 1 segundo. Para a diferença de tempo entre os deslocamentos máximos positivos dos dois métodos, é igualmente de 1 segundo.

Para analisar com mais precisão e consistência os dois métodos, foi possível detalhar o Quadro 4.3.3. Este quadro pretende quantificar os desvios relativos máximos e mínimos observados em cada ciclo.

Os dados do Quadro 4.3.3 indicam que o desvio entre o LVDT A25 e o DIC para cada ciclo do ensaio nº3, é mínimo.

Quadro 4.3.3 - Desvio relativo do deslocamento entre o LVDT A25 e o ponto C, na direção Y.

Δ do deslocamento entre o LVDT A 25 e o ponto C, na direção Y		
Ciclo	Máximo negativo (mm)	Máximo positivo (mm)
1º ciclo	-3.04	0.86
2º ciclo	-3.08	-
3º ciclo	-3.28	0.47
4º ciclo	-3.52	0.92
5º ciclo	-3.98	1.30
6º ciclo	-4.09	1.95
7º ciclo	-5.01	2.37
8º ciclo	-6.39	3.35
Total ensaio nº 3	-6.39	3.35

4.3.4 Ensaio nº 4

Da mesma forma que para os outros ensaios, com os resultados do ensaio nº4 foi possível construir um gráfico e o quadro com os valores, de modo a averiguar se os dois métodos sustentam os mesmos resultados.

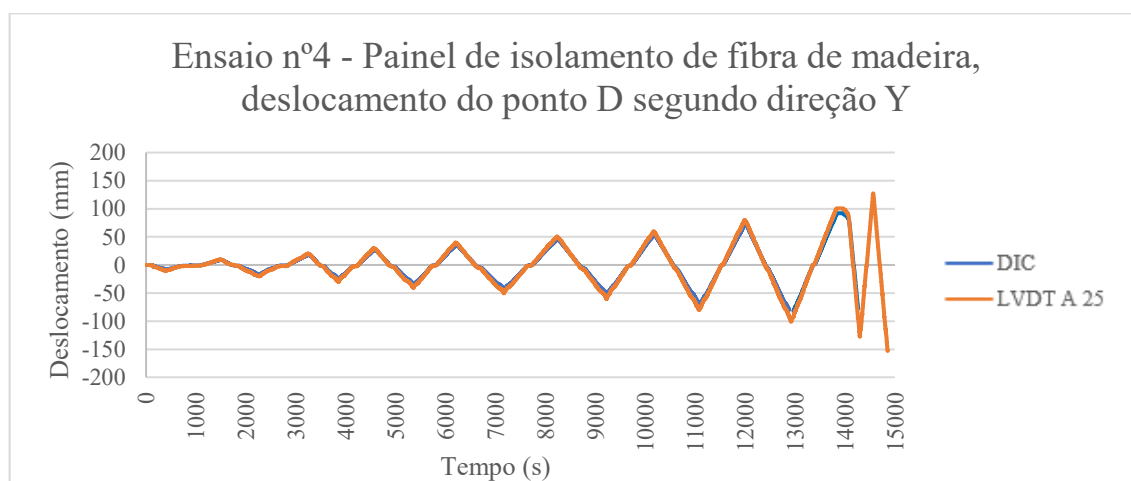


Figura 4.3.4 - Gráfico com os resultados do ensaio nº4 do painel de isolamento de fibra de madeira, segundo direção Y.

A partir do gráfico da Figura 4.3.4 é possível de visualizar que os resultados oferecidos pelos dois métodos apresentam o mesmo perfil de comportamento até ao sétimo ciclo, no entanto

contêm erros associados. O oitavo ciclo apresenta uma diferença significativa entre os dados do LVDT A25 e o DIC, apresentando vários erros graves durante este ciclo. Ao longo deste ensaio, o LVDT A25 atinge um deslocamento máximo negativo de -152,87 mm após 14857 segundos do início do ensaio e um máximo positivo de 157,43 mm ao fim de 15370 segundos. Em contrapartida, o DIC atingiu um deslocamento máximo negativo de -82,57 mm ao fim de 12967 segundos e um máximo positivo de 143,87 mm ao fim de 15384 segundos. Assim, é possível de identificar que ao fim de 70,29 segundos (ou seja, 1 minuto e 17 segundos) do LVDT A25 ter atingido o deslocamento máximo negativo, também o DIC atinge o seu máximo negativo. Da mesma forma que o DIC atinge o seu máximo positivo ao fim de 82,57 segundos do LVDT A25, ou seja, ao fim de 1 minuto e 37 segundos.

Houve a primeira falha na captura do DIC ao fim de 12882 segundo que durou 84 segundos, sendo que o último valor registado do deslocamento foi de -79,88 mm. A segunda falha na captura aconteceu ao fim de 14262 segundos desde o início do ensaio, apresentando um deslocamento final de -77,82 mm e decorreu ao longo de 90 segundos. A terceira, e última falha na captura, sucedeu-se ao fim de 14797 segundos desde o início do ensaio, apresentando um deslocamento final capturado de -81,15 mm e durou cerca de 316 segundos.

Quadro 4.3.4 - desvio relativo do deslocamento entre o LVDT A25 e o ponto D, na direção Y.

Δ do deslocamento entre o LVDT A 25 e o ponto D, na direção Y		
Ciclo	Máximo negativo (mm)	Máximo positivo (mm)
1º ciclo	-1.34	2.77
2º ciclo	-2.36	3.97
3º ciclo	-3.67	7.07
4º ciclo	-4.94	7.20
5º ciclo	-5.57	8.07
6º ciclo	-7.14	9.30
7º ciclo	-8.56	11.25
8º ciclo	-100.98	12.54
Total ensaio nº 4	-100.98	12.54

Com o auxílio do quadro apresentado, é de notar que o desvio entre o LVDT A25 e o DIC é mínimo até ao sétimo ciclo, sendo que o oitavo ciclo demonstra uma subida drástica na diferença do desvio entre os dois métodos, que confirma os dados obtidos pelo gráfico.

4.4 Discussão

O comportamento estrutural dos dois tipos de painéis de isolamento, nomeadamente a lã de rocha e a fibra de madeira, foram estudados através de quatro ensaios. O ensaio nº1 foi feito com o painel de isolamento de lã de rocha, enquanto os ensaios nº2, nº3 e nº4 avaliaram o comportamento dos painéis de isolamento de fibra de madeira. O primeiro objetivo baseou-se na análise do comportamento dos painéis em condições específicas, utilizando duas técnicas de medição distintas: a correlação de imagem digital (DIC) e os transformadores diferenciais de variável linear (LVDT). O segundo objetivo pretendia verificar se a correlação de imagem digital fornecia os mesmos dados que a medição padrão, ou seja, os LVDT's.

No ensaio nº1, o painel de isolamento foi submetido a um ensaio cíclico, conforme mostrado na Figura 4.3.1. Este gráfico exibe vários ciclos de deslocamento, indicando um movimento com variação de uma posição extrema a outra. As medições do LVDT A17 e do DIC mostraram um perfil de comportamento similar, sugerindo uma boa precisão assim como a nível da consistência nos métodos. O Quadro 4.3.1 indica que o desvio relativo máximo variou de -2,58 mm a -3,28 mm, entre o primeiro e o oitavo ciclo. Estes valores ilustram a extensão das discrepâncias entre as medições pelos dois métodos, sendo importante realçar que os valores de desvios mais altos, indicam maiores discrepâncias entre os métodos.

Os ensaios nº2, nº3 e nº4 dizem respeito aos painéis de isolamento de fibra de madeira e tiveram os mesmos objetivos que os do ensaio nº1. Os gráficos apresentados mostram um ensaio cíclico padrão para cada ensaio. Comparando os resultados, conclui-se que os gráficos dos dois métodos apresentam um comportamento semelhante em todos os ensaios, em especial para os primeiros ciclos. A consistência entre as medições validou a credibilidade dos dois métodos na captura dos deslocamentos dos pontos estudados. No caso do ensaio nº2, o desvio relativo máximo variou entre -1,96 mm a -20,98 mm. Para o ensaio nº3, o desvio relativo máximo variou entre -3,04 mm a -6,39 mm em relação aos dois métodos. Por último, para o ensaio nº4, o desvio relativo máximo oscilou entre -1,34 mm a -100,97 mm.

Comparando os resultados dos quatro ensaios, é possível detetar alguns aspetos. Tanto nos ensaios dos painéis de isolamento de lã de rocha como dos painéis de isolamento de fibra de madeira, os resultados medidos a partir do DIC e dos LVDTs mostraram uma tendência de valores semelhantes, relacionando assim os métodos de medição.

As discrepâncias observadas nos quatro ensaios podem dever-se a três aspetos:

- a diferença de material, uma vez que no primeiro ensaio o objeto de estudo, refere-se ao painel de isolamento de lã de rocha e nos últimos três ensaios ao painel de isolamento de fibra de madeira, pois são materiais com espessuras diferentes;
- o facto dos LVDT serem instrumentos relativos permite que estejam em contacto com a espuma dos painéis, ou seja estão fixos ao suporte de ensaio, enquanto que o DIC é considerado um instrumento absoluto, que faz a leitura dos deslocamentos da chapa de aço, sem qualquer contacto direto. Dessa forma, o LVDT está sujeito a deformações locais do corpo de prova.
- ao ser assumido que a medição dos deslocamentos pelos dois métodos é idêntica, sendo que na realidade o DIC mede os deslocamentos num ponto definido no centro do painel e o LVDT mede os deslocamentos num ponto localizado na extremidade do painel.

Assim, pode-se perceber que tanto o DIC como os LVDTs apresentam vantagens e desvantagens. A escolha entre estes dois métodos, está sujeito aos requisitos específicos do estudo em análise. É possível concluir que o DIC fornece uma ampla possibilidade de captura de dados com precisão, permitindo que no futuro não seja necessária aplicar uma extensa instrumentação. No entanto, para se conseguir obter resultados 100% fidedignos, será sempre aconselhável, aplicar os dois métodos, não sendo no entanto necessário dispor de inúmeros LVDTs.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A presente dissertação explorou vários aspetos ao nível de painéis de isolamento com baixo teor de carbono, perspetivando a sua utilização, com vista à sustentabilidade dos edifícios. A partir de uma análise aprofundada da literatura, de um estudo de avaliação de ciclo de vida e de análises experimentais, foram obtidas informações valiosas, que em conjunto salientam a importância de se poder integrar painéis de isolamento de baixo carbono, ao nível da construção sustentável.

No que respeita a componente ambiental, a revisão da literatura destacou as emissões de carbono associadas a materiais de isolamento convencionais. Estes materiais contribuem para as emissões de gases com efeito de estufa durante os seus processos, assim como, apresentam uma má opção para o fim de vida. Os efeitos ambientais adversos dos materiais de isolamento convencionais, sublinham a necessidade de explorar alternativas que possam reduzir a pegada de carbono nos edifícios. Como tal, os painéis de isolamento com baixo teor de carbono oferecem uma solução promissora nesse sentido.

A partir do momento que se usam materiais sustentáveis e ecologicamente corretos, como materiais naturais ou reciclados, esses painéis permitem minimizar significativamente o carbono libertado. Os benefícios ambientais destes painéis com baixo teor de carbono, vão para além das emissões de carbono, pois além de promoverem o uso eficiente dos recursos, também minimizam a geração de recursos e ainda apoiam os princípios do desenvolvimento sustentável.

Posteriormente, foi realizado um estudo relativamente à ACV para avaliar o impacto ambiental dos dois painéis de isolamento em investigação. Essa avaliação considerou o carbono incorporado, o impacto no ciclo de vida e a pegada carbónica. Ao considerar o ciclo de vida completo, em relação aos painéis de isolamento, desde a extração de matérias-primas até à deposição final de vida dos materiais, o estudo destacou a importância de adotar uma abordagem abrangente, em relação às práticas de construção sustentável.

As matérias-primas utilizadas, são consideradas os elementos-chave, que constituem a espuma em relação ao isolamento do painel. Relativamente à fibra de madeira, a sua extração é procedente das florestas, enquanto a lã de rocha é das pedreiras. Assim, a extração de rochas provocará um maior impacto ambiental devido ao processo intensivo de energia, uma vez que

não é possível substituir essas matérias-primas. As fibras de madeira como têm origem na casca das árvores, podem ser substituídas, resultando em impactos ambientais menores. A produção da espuma de cada material, é consideravelmente diferente entre eles, originando impactos ambientais diferentes. A lã de rocha é formada pela fusão de grãos de pedra, significando uma grande libertação de gases com efeito de estufa. Por outro lado, a produção da fibra de madeira requer temperaturas mais baixas, resultando em menores quantidades de gases libertados. Dessa forma, a análise demonstrou que o uso de painéis de isolamento de fibra de madeira pode reduzir significativamente as emissões e o consumo de recursos ao longo do ciclo de vida em comparação com materiais de isolamento tradicionais. Isso ressalta o seu potencial como forma de contribuir para a sustentabilidade geral dos edifícios, minimizando a sua pegada ambiental.

Por outro lado, na componente experimental, os resultados da análise experimental realizada no capítulo 4, demonstraram que a comparação feita entre os métodos de correlação de imagem digital (DIC) e os transformadores diferenciais de variável linear (LVDT), revelou de forma brilhante, que o DIC produziu resultados comparáveis ao LVDT, apontando para uma alternativa promissora, em relação às futuras análises experimentais. A natureza sem contacto e a alta precisão do DIC, fazem dele a escolha favorável, facilitando a medição eficiente e confiável de deformações e de deslocamentos. Estas descobertas contribuem não só para o contexto específico dos painéis de isolamento, como também tem implicações mais amplas, quer a nível de testes estruturais como de outros materiais.

Tendo em consideração as conclusões retiradas de cada capítulo, é evidente que a pesquisa realizada nesta dissertação fornece evidências consideráveis que apoiam a integração de painéis de isolamento com baixo teor de carbono em práticas sustentáveis de construção. Ao utilizar estes painéis, existem avanços significativos que podem ser feitos na redução das emissões de carbono e na minimização do impacto ambiental. Dessa forma, é oportuno afirmar que os painéis de isolamento de fibra de madeira oferecem um enorme potencial, como referência de material de isolamento sustentável para o futuro. A sua natureza renovável, o seu baixo impacto ambiental e as suas características de desempenho favoráveis, posiciona-os como uma alternativa de confiança face aos materiais de isolamento tradicionais.

Em conclusão, esta dissertação forneceu uma análise abrangente dos painéis de isolamento com baixo teor de carbono, assim como, definiu o seu papel relativamente à promoção da sustentabilidade dos edifícios. As descobertas destacam o potencial destes painéis na redução do impacto ambiental dos edifícios e em simultâneo, melhorar a eficiência energética. Ao integrar estes painéis nos projetos de construção, é possível contribuir significativamente em direção a um futuro mais sustentável, onde as edificações desempenham um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas e na criação de comunidades ambientalmente responsáveis.

5.2 Trabalhos Futuros

Embora esta dissertação tenha feito progressos de forma significativa no âmbito da exploração dos aspetos da sustentabilidade e no desempenho dos painéis de isolamento de fibra de madeira, existem vários estudos e análises futuras que podem aprimorar esta compreensão e contribuir para o campo das práticas de construção sustentável. Alguns exemplos desses estudos são:

- A realização de uma avaliação mais abrangente da análise do ciclo de vida, abrangendo todas as etapas, incluindo de B1 a B7;
- A avaliação de todos os indicadores da análise de ciclo de vida e fazer uma comparação dos resultados, para os painéis em estudo;
- Averiguar se os erros relativos obtidos na análise experimental, são erros aleatórios ou demonstram algum padrão que deve ser tido em conta no futuro;
- Realizar uma comparação dos resultados da análise experimental, segundo os eixos X, Y e Z e se os resultados vão ao encontro do investigado nesta dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2008). Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board. *Energy and Buildings*, 40(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.12.009>
- Asdrubali, F., Pisello, A. L., D'Alessandro, F., Bianchi, F., Fabiani, C., Cornicchia, M., & Rotili, A. (2016). Experimental and numerical characterization of innovative cardboard based panels: Thermal and acoustic performance analysis and life cycle assessment. *Building and Environment*, 95, 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.003>
- AssuncaoI. (2021). 2021.03.10_aula aberta U.Minho. https://www.csustentavel.com/wp-content/uploads/2021/03/solues-em-l-mineral_knaufinsulation.pdf
- Bigger, R., Blaysat, B., Boo, C., Grewer, M., Hu, J., Jones, A., Klein, M., Raghavan, K., Reu, P., Schmidt, T., Siebert, T., Simenson, M., Turner, D., Vieira, A., & Weikert, T. (2018). *A Good Practices Guide for Digital Image Correlation* (E. Jones & M. Iadicola, Eds.). <https://doi.org/10.32720/idics/gpg.ed1>
- Biswas, K., Shrestha, S. S., Bhandari, M. S., & Desjarlais, A. O. (2016). Insulation materials for commercial buildings in North America: An assessment of lifetime energy and environmental impacts. *Energy and Buildings*, 112, 256–269. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.013>
- Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 26, pp. 379–388). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>
- Colli, C., Bataille, A., & Antczak, E. (2020). Investigating eco-efficiency procedure to compare refurbishment scenarios with different insulating materials.
- Daphabitat. (2016a). *DAP AGLOMERADO DE CORTIÇA EXPANDIDA (ICB)*. www.daphabitat.pt
- Daphabitat. (2016b). *DAP GRANULADO DE CORTIÇA EXPANDIDA*. www.daphabitat.pt
- Daphabitat. (2017). *DAP AGREGADO LEVE DE ARGILA EXPANDIDA LECA®*. www.daphabitat.pt
- Daphabitat. (2019). *DAP LÃ DE ROCHA*. www.daphabitat.pt

-
- De Pelegrin, J., Monte De Carvalho, B., Bertotti, L., & Lafay, J.-M. S. (2017). *Development and Evaluation of a Linear Variable Differential Sensor*.
- Demertzi, M., Sierra-Pérez, J., Paulo, J. A., Arroja, L., & Dias, A. C. (2017). Environmental performance of expanded cork slab and granules through life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 145, 294–302. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.071>
- Densley Tingley, D., Hathway, A., & Davison, B. (2015). An environmental impact comparison of external wall insulation types. *Building and Environment*, 85, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.021>
- Dickson, T., & Pavía, S. (2021). Energy performance, environmental impact and cost of a range of insulation materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110752>
- ECIA. (2018). *EPD Loose fill cellulose insulation*. www.ecia.eu.com
- EN 15804:2012+A2:2019. *Sustainability of construction works*.
- Füchsl, S., Rheude, F., & Röder, H. (2022). Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A critical review. *Cleaner Materials*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100119>
- Gomes, R., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2020). Environmental life cycle assessment of the manufacture of EPS granulates, lightweight concrete with EPS and high-density EPS boards. *Journal of Building Engineering*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101031>
- Habitat, C. (2022). *REGRAS PARA A CATEGORIA DE PRODUTO ISOLAMENTO TÉRMICO*. www.daphabitat.pt
- Hunkeler, D. (2016). Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(7), 1063–1066. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1083-z>
- IBU. (2015). *EPD GUTEX Holzfaserplattenwerk*. www.gutex.de
- IBU. (2019a). *EPD Extruded Polystyrene (XPS) Foam Insulation with halogen free blowing agent*. www.tn-i.com
- IBU. (2019b). *EPD Insulation board made of Neopor® Plus*. www.ibu-epd.com/https://epd-online.com
- IBU. (2019c). *EPD Kingspan Insulation B.V.*
-

-
- IBU. (2019d). *EPD Polyurethane thermal insulation spray foam*. www.bau-umwelt.de.
- IBU. (2020a). *Cold Rolled Steel Coils*. www.ibu-epd.com[|https://epd-online.com](https://epd-online.com)
- IBU. (2020b). *PAVATEX SAS*. <https://epd-online.com>
- IBU. (2021). *EPD SAGLAN glass wool, bonded with phenolic resin*.
- Instruments N. (2017). *Dantec's Digital Image Correlation (DIC) An optimal method for optical measurement applications*.
- Instruments, N. (2017). *Introduction to Digital Image Correlation (DIC)*.
- ISO 14040:2006. *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*, International Standards Organization, Geneva.
- ISO 14040:2006. *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*, International Standards Organization, Geneva.
- João, A., Faria, P., Orientadores, R., João, D., Soares De Almeida, A., José, A., & Tadeu, B. (2014). *Eco-painéis construídos a partir de madeira e resíduos de palha/casca de arroz Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções*. <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/38631>
- Joshi, S. (2017). Linear Variable Differential Transducer (LVDT) & Its Applications in Civil Engineering. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 3(4), 62. <https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20170304.13>
- Käpplein, S., Misiek, T., Karlsruher Institut für Technologie (KIT), & Versuchsanstalt für Stahl, H. und S. (2011). *EASIE-In-plane shear resistance of sandwich panels*. <https://www.researchgate.net/publication/303843571>
- Martins, C., Inca, E., Mesquita, A., Jordão, S., & Rebelo, C. (2022). *DIGITAL IMAGE CORRELATION VS STANDARD MEASURING FOR DYNAMIC TESTS OF A GLASS FAÇADE STRUCTURE*.
- Mccormick, N., & Lord, J. (2010). Digital Image Correlation. In *NUMBER* (Vol. 13).
- Oliveira Augusto, C., Bragança, L., & Almeida, M. (2016). *Materiais de isolamento térmico de edifícios. Para além da energia operacional*. https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/44588/1/2341-Habitat%20Sustentable_Carlos%20Oliveira_2016.pdf
-

-
- Pan, B. (2018). Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals. In *Measurement Science and Technology* (Vol. 29, Issue 8). Institute of Physics Publishing.
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/aac55b>
- Pan, B., & Li, K. (2011). A fast digital image correlation method for deformation measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(7), 841–847.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.02.023>
- Pargana, N., Pinheiro, M., Silvestre, J.D., & Brito, J.D. (2014), Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings.
- Ramos, T., Furtado, A., Eslami, S., Alves, S., Rodrigues, H., Arêde, A., Tavares, P. J., & Moreira, P. M. G. P. (2015). 2D and 3D Digital Image Correlation in Civil Engineering - Measurements in a Masonry Wall. *Procedia Engineering*, 114, 215–222.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.061>
- Ricciardi, P., Belloni, E., & Cotana, F. (2014). Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment. *Applied Energy*, 134, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.112>
- Rocchi, L., Paolotti, L., Fagioli, F. F., & Boggia, A. (2018). Production of insulating panel from pruning remains: An economic and environmental analysis. *Energy Procedia*, 147, 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.044>
- Salunkhe, A. A., Gobinath, R., Vinay, S., & Joseph, L. (2022). Progress and Trends in Image Processing Applications in Civil Engineering: Opportunities and Challenges. In *Advances in Civil Engineering* (Vol. 2022). Hindawi Limited.
<https://doi.org/10.1155/2022/6400254>
- Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 62, pp. 988–1011). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>
- Schulte, M., Lewandowski, I., Pude, R., & Wagner, M. (2021). Comparative life cycle assessment of bio-based insulation materials: Environmental and economic performances. *GCB Bioenergy*, 13(6), 979–998. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12825>
- Sierra-Pérez, J., Boschmonart-Rives, J., Dias, A. C., & Gabarrell, X. (2016). Environmental implications of the use of agglomerated cork as thermal insulation in buildings. *Journal of Cleaner Production*, 126, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.146>
-

- Silvestre, J. D., Pargana, N., De Brito, J., Pinheiro, M. D., & Durão, V. (2016). Insulation cork boards-environmental life cycle assessment of an organic construction material. *Materials*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/ma9050394>
- Skarlatos, D., & Yiatros, S. (2016). DEFORMATION MONITORING OF MATERIALS UNDER STRESS IN LABORATORY EXPERIMENTS. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III-5, 35–41. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-iii-5-35-2016>
- Speranzini, E., & Agnetti, S. (2014). The technique of digital image correlation to identify defects in glass structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 21(6), 1015–1029. <https://doi.org/10.1002/stc.1629>
- Tártaro, A. S., Mata, T. M., Martins, A. A., & Esteves da Silva, J. C. G. (2017). Carbon footprint of the insulation cork board. *Journal of Cleaner Production*, 143, 925–932. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.028>
- Yuan, Y., Zhou, Y., Liu, W., & Chen, J. (2020). Flexural deformation characterization of glass panel in curtain walls based on digital image correlation technique. *Construction and Building Materials*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119819>
- Zieger, V., Lecompte, T., & Hellouin de Menibus, A. (2020). Impact of GHGs temporal dynamics on the GWP assessment of building materials: A case study on bio-based and non-bio-based walls. *Building and Environment*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107210>

ANEXO A - DADOS DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO CML 2001- AUG. 2016

	Camião articulado (40 ton) incl. Combustível (unidade funcional: 1 tkm)
Potencial de acidificação [kg SO₂ eq.]	2.15E-04
Potencial de aquecimento global [kg CO₂ eq.]	5.03E-02
Potencial de depleção da camada de ozono [kg R11 eq.]	1.00E-10
Potencial de depleção de recursos abióticos (elementos) [kg Sb eq.]	1.99E-09
Potencial de depleção de recursos abióticos (combustível fóssil) [MJ.]	7.06E-01
Potencial de ecotoxicidade aquática de água doce [kg DCB eq.]	6.13E-05
Potencial de ecotoxicidade aquática de água salgada [kg DCB eq.]	8.85E-01
Potencial de ecotoxicidade terrestre [kg DCB eq.]	2.54E-05
Potencial de eutrofização [kg fosfato eq.]	4.99E-05
Potencial de formação de ozono troposférico [kg etileno eq.]	1.91E-05
Potencial de toxicidade humana [kg DCB eq.]	2.20E-03

ANEXO B - DADOS DE RESÍDUOS EM ATERRO CML 2001- AUG. 2016

	Matéria inerte (resíduos de construção) em aterro (unidade funcional: 1 kg de resíduos)
Potencial de acidificação [kg SO₂ eq.]	8.64E-05
Potencial de aquecimento global [kg CO₂ eq.]	1.44E-02
Potencial de depleção da camada de ozono [kg R11 eq.]	7.92E-17
Potencial de depleção de recursos abióticos (elementos) [kg Sb eq.]	5.29E-09
Potencial de depleção de recursos abióticos (combustível fóssil) [MJ.]	1.95E-01
Potencial de ecotoxicidade aquática de água doce [kg DCB eq.]	6.12E-05
Potencial de ecotoxicidade aquática de água salgada [kg DCB eq.]	3.08E+00
Potencial de ecotoxicidade terrestre [kg DCB eq.]	3.95E-04
Potencial de eutrofização [kg fosfato eq.]	9.82E-06
Potencial de formação de ozono troposférico [kg etileno eq.]	6.58E-06
Potencial de toxicidade humana [kg DCB eq.]	7.52E-04