



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **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

Autor

**João Pedro Faria Rama**

Orientadores

**Professor Doutor João António Soares de Almeida**

**Professor Doutor António José Barreto Tadeu**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Janeiro, 2014**

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar aos meus orientadores, Professor Doutor João António Soares Almeida e Professor Doutor António José Barreto Tadeu, pelo apoio prestado, pela sua orientação e sobretudo pela partilha do vasto conhecimento que possuem.

Agradeço a toda a equipa do ITeCons, pelo apoio na realização de ensaios e estudos conduzidos. À Eng.<sup>a</sup> Inês Santos pela importante ajuda na avaliação de ciclo de vida, ao Eng.º António Nascimento e ao Doutor Igor Castro pelo apoio nos ensaios acústicos, ao Eng.º José Nascimento e ao Eng.º Saúl Martins pelo apoio nos ensaios térmicos.

Agradeço à Câmara Municipal de Montemor-o-Velho, que permitiu o acesso ao estudo BIODEN. Agradeço ainda, à Carpintaria Murta, pela fabricação das caixas de madeira, essenciais à realização dos ensaios, e à Cooperativa Agrícola de Montemor-o-Velho, na pessoa do Eng.º Dias, pela disponibilização de dados e informações úteis à realização do trabalho.

Agradeço aos meus pais Maria Odete e José Maia, por terem proporcionado a minha formação, e pelo apoio e educação que me deram desde sempre. Ao meu irmão Luís Rama e a toda a restante família que sempre me deram força sobretudo nesta reta final. À Diana Pádua pela paciência que teve comigo e por todo o incentivo que me foi dando nos últimos anos. E por último a todos os meus amigos, de infância, de escola e faculdade, por serem também eles uma família.

## RESUMO

Portugal enfrenta enormes desafios impostos por metas ambientais e pela atual situação económica e social da Europa. Neste contexto, a eco-edificação assume um papel importante no sector da construção. Apesar do recurso a materiais sustentáveis não ser novo, continua a existir uma enorme oportunidade tecnológica na otimização e caracterização de sistemas construtivos que potenciem o máximo benefício destes materiais. Por outro lado, há necessidade de verificar a capacidade de industrializar estas técnicas que, até ao momento, apresentam uma utilização pouco sistemática.

Com este trabalho, pretendeu-se desenvolver uma solução de painel de parede inovadora (eco-painel), composta por madeira e palha ou casca de arroz, orientada para o mercado da eco-edificação. Previsivelmente, a utilização destes materiais possibilitará a definição de um produto sustentável, com impacte ambiental inferior ao de produtos concorrentes, e com propriedades de isolamento térmico e acústico adequadas. O estudo experimental foi conduzido nas instalações laboratoriais do ITeCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção, recorrendo a um conjunto de equipamentos adequados à determinação da condutibilidade térmica e do índice de isolamento sonoro da solução construtiva. O eco-painel estudado foi também sujeito a uma avaliação de ciclo de vida.

Os sistemas compostos por palha e casca de arroz foram comparados com os de soluções construtivas equivalentes constituídas por diferentes lâs de rocha, sendo os resultados obtidos indicadores de níveis de isolamento térmico e acústico adequados aos objetivos de aplicação. De salientar, ainda, que a solução construtiva estudada integra na sua estrutura subprodutos do setor agrícola, mais concretamente da região do Baixo Mondego, acrescentando assim um novo significado à ecoeficiência da solução proposta.

Palavras-chave: Eco-edificação; Palha/casca de arroz; Isolamento térmico e acústico; Avaliação de Ciclo de Vida.

## ABSTRACT

Portugal faces enormous challenges imposed by environmental goals and by the current economic and social situation that Europe is experiencing. In this context, the eco-edification assumes an important role in the construction sector. Although the use of sustainable materials isn't new, still exists a huge technologic opportunity in the optimization and characterization of constructive systems that potentiates the maximum benefit of this materials. In the other hand, there is a need to verify the ability to industrialize these techniques which, until now, show a less systematic use.

With this work, it was intended to develop an innovative solution of wall panel (eco-panel), composed by wood and rice straw or husk, oriented for the market of eco-edification. Predictably, the use of these materials will allow the definition of a sustainable product with an environmental impact lower than the concurrent products, and with appropriate thermic and acoustic properties. The experimental study was conducted in the laboratory facilities of ITeCons - Institute for Research and Technological Development in Construction Sciences, using a set of proper equipment for determining the thermal conductivity and sound isolation index of the constructive solution. The eco-panel study was also subject to an assessment of the life cycle.

The systems composed of rice straw and rice husk systems were compared to those of an equivalent constructive solutions composed of different rock wool, and the results obtained were indicators of levels of thermal and acoustic isolation appropriate to the objectives of the application. To point, also, that constructive solution integrates in its structure sub products of the agricultural sector, more specifically of the region of "Baixo Mondego", adding a new meaning to the eco-efficiency of the proposed solution.

Keywords: Eco-edification; rice straw/husk; Thermal and acoustic isolation; Rice straw/husk, Life Cycle Assessment

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
ÍNDICE DE QUADROS .....	vi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Estrutura da Dissertação .....	1
1.2 Enquadramento do Tema .....	1
1.3 Objetivos do Trabalho .....	2
2 ESTADO DA ARTE .....	4
2.1 Considerações Gerais.....	4
2.2 Cultura de Arroz no Baixo Mondego.....	5
2.3 Construção Sustentável.....	6
2.3.1 Utilização de Resíduos Industriais .....	6
2.3.2 Utilização de Recursos Naturais e Resíduos de Biomassa.....	8
2.4 Exigências Funcionais .....	10
3 MATERIAIS E TÉCNICAS .....	13
3.1 Considerações Iniciais .....	13
3.2 Materiais .....	13
3.2.1 Palha e Casca de Arroz.....	13
3.2.2 Lã de Rocha .....	15
3.2.3 Madeira OSB .....	16
3.3 Condições Experimentais .....	16
3.3.1 Ensaios Térmicos.....	16
3.3.2 Condições de Ensaio Térmico .....	18
3.3.3 Ensaios Acústicos .....	18
3.3.4 Condições de Ensaio Acústico .....	19
3.4 Definição dos Provetes .....	19
3.4.1 Ensaios Térmicos.....	19
3.4.2 Ensaios Acústicos .....	20
3.5 Avaliação do Ciclo de Vida.....	22
3.5.1 Metodologia Avaliação do Ciclo de Vida .....	22
3.5.1 Modelo e Inventário do Ciclo de Vida .....	24
4 RESULTADOS .....	29
4.1 Resultados dos Ensaios Térmicos.....	29
4.2 Resultados dos Ensaios Acústicos .....	34
4.3 Resultados da Avaliação do Ciclo de Vida.....	38
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	41
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	42
7 ANEXOS.....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema representativo do painel de parede estudado. ....	3
Figura 2.1 – Exemplo de uma construção feita a partir de fardos de palha de trigo, <i>Straw Bale Cabin</i> , situado em Yorkshire, Reino Unido [57]. ....	10
Figura 3.1 – Equipamento $\lambda$ -Meter EP500e [64]. ....	17
Figura 3.2 – Definição da zona de medição. ....	18
Figura 3.3 – Esquema geral do sistema de câmaras horizontais móveis [65]. ....	19
Figura 3.4 – Dimensões da caixa OSB utilizada nos ensaios térmicos. ....	20
Figura 3.5 – Pormenor de calço que permite garantir a espessura do provete constante. ....	20
Figura 3.6 – Aro pré fabricado utilizado nos ensaios de isolamento a sons aéreos. ....	21
Figura 3.7 – Dimensões da caixa OSB utilizada nos ensaios acústicos. ....	21
Figura 3.8 – Fases fundamentais da Avaliação de Ciclo de Vida (adaptado de [69]). ....	23
Figura 3.9 – Etapas gerais da Avaliação de Ciclo de Vida (adaptado de [68]). ....	24
Figura 3.10 – Fluxograma do ciclo de vida ( <i>cradle-to-gate</i> ) de 1 m <sup>2</sup> de painel de parede. ....	25
Figura 4.1 – Valor de condutibilidade térmica em função da massa volúmica para a mesma espessura de 135 mm. ....	32
Figura 4.2 – Curva de isolamento sonoro normalizado da caixa de madeira OSB sem enchimento. ....	35
Figura 4.3 – Curva de isolamento sonoro normalizado da caixa de madeira OSB vazia e preenchida com palha de arroz para diferentes massas volúmicas. ....	36
Figura 4.4 – Curva de isolamento sonoro normalizado da caixa de madeira OSB vazia e preenchida com casca de arroz para diferentes massas volúmicas. ....	37
Figura 4.5 – Curva de isolamento sonoro normalizado da caixa de madeira OSB vazia e preenchida com diferentes lãs de rocha (120kg/m <sup>3</sup> ). ....	38
Figura 4.6 – Avaliação ambiental comparativa da etapa de produção dos painéis de parede com distintos preenchimentos. ....	39
Figura 4.7 – Avaliação energética comparativa da etapa de produção dos painéis de parede com distintos preenchimentos. ....	40

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Propriedades de isolamento térmico de diferentes agro-resíduos em função da massa volúmica e espessura [53].	9
Quadro 3.1 – Massas volúmicas de casca e palha de arroz ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) [62].	14
Quadro 3.2 – Quantidades de palha e casca de arroz utilizadas nos ensaios térmicos e acústicos.	15
Quadro 3.3 – Quantidades de lã de rocha utilizadas nos ensaios térmicos e acústicos.	15
Quadro 3.4 – Estimativa da quantidade de produtos provenientes da cultura do arroz utilizados na alocação mássica.	25
Quadro 3.5 – Preço médio de mercado de produtos provenientes da cultura do arroz utilizados na alocação económica.	26
Quadro 3.6 – Inventário do ciclo de vida de $1 \text{ m}^2$ de painel de parede com distintos preenchimentos.	26
Quadro 3.7 – Descrição das categorias de impacte.	27
Quadro 4.1 – Resultados dos ensaios térmicos das placas de madeira OSB.	29
Quadro 4.2 – Resultados dos ensaios térmicos da caixa de madeira OSB + palha de arroz ( $m_{\text{palha}}=1398\text{g}$ )	30
Quadro 4.3 – Resultados dos ensaios térmicos da caixa de madeira OSB + palha de arroz ( $m_{\text{palha}}=2080\text{g}$ )	31
Quadro 4.4 – Resultados dos ensaios térmicos da caixa de madeira OSB + palha de arroz triturada ( $m_{\text{palha}}=4100\text{g}$ ).	31
Quadro 4.5 – Resultados dos ensaios térmicos da caixa de madeira OSB + palha de arroz seca ( $m_{\text{palha}}=1897\text{g}$ ).	32
Quadro 4.6 – Resultados dos ensaios térmicos da caixa de madeira OSB + preenchimento casca de arroz ( $m_{\text{casca}}=6031\text{g}$ ).	33
Quadro 4.7 – Resultados dos ensaios térmicos da caixa de madeira OSB + preenchimento lã de rocha ( $m_{\text{lã}}=4900\text{g}$ ) para diferentes produtos de lã de rocha: (i) RockTerm - TERMOLAN, (ii) RockWool – XFLOC, e (iii) rocha Lapinus.	33

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Estrutura da Dissertação

A dissertação que aqui se apresenta encontra-se dividida em cinco capítulos principais. Na Introdução, é feito um enquadramento do tema no que respeita às políticas de crescimento europeias. Descreve-se, ainda, de forma concisa, os principais objetivos do trabalho. No Estado da Arte, apresenta-se uma cuidada revisão de estudos relacionados com o tema. Analisam-se, simultaneamente, casos de estudo e exemplos de boas práticas com relevância para este trabalho. Em Materiais e Técnicas, descreve-se com rigor as condições de estudo empregues na persecução dos ensaios, bem como as metodologias adotadas na avaliação de ciclo de vida. Em Resultados, apresentam-se e analisam-se os dados obtidos sobre a caracterização térmica e acústica da solução construtiva estudada e sobre a avaliação de ciclo de vida. Ainda neste capítulo, são apresentados e comparados os resultados relativos à solução estudada e a soluções constituídas por lâ de rocha. No último capítulo é feito um conjunto de considerações sobre o conteúdo desta dissertação.

## 1.2 Enquadramento do Tema

A crescente preocupação da Europa e das respetivas autoridades reguladoras com a utilização racional dos recursos e da energia tem-se traduzido na imposição de importantes metas, das quais se destacam as identificadas na “Estratégia Europa 2020”. A respeito do “Clima e Energia”, exige-se, por um lado, a intensificação do recurso a fontes de energia renováveis e, por outro, a conceção de soluções mais eficientes em termos do consumo energético. Exige-se, ainda, uma significativa redução da emissão de gases com efeitos de estufa. De facto, as mais recentes orientações da Comissão Europeia vão no sentido de uma política energética e ambiental integradas [1].

Os mesmos princípios, de proteção dos recursos naturais e de energia, têm sido defendidos pela Comissão Europeia, desde logo na Diretiva 2009/125/EC do Parlamento e do Conselho de 21 de Outubro de 2009 [2], relativa à criação de um quadro para definir os requisitos de conceção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia. Segundo este documento, “muitos dos produtos relacionados com o consumo de energia podem ser significativamente melhorados para reduzir os impactes ambientais e realizar poupanças de energia, através da melhoria da sua conceção, o que leva em simultâneo a uma economia de



custos para as empresas e os consumidores finais”. No mesmo documento é ainda referido que “para além dos produtos que utilizam, geram, transferem ou medem energia, certos produtos relacionados com o consumo de energia, incluindo produtos utilizados na construção tais como janelas, materiais de isolamento ou dispositivos de consumo de água tais como os chuveiros ou as torneiras poderiam também contribuir para significativas poupanças de energia durante a utilização”.

Da mesma forma, o novo regulamento dos produtos da construção (Regulamento (UE) n.º 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 9 de Março de 2011 [3]) prevê um novo requisito básico para as obras de construção relativo à “utilização sustentável dos recursos naturais”, pretendendo assegurar a “reutilização ou a reciclabilidade das obras de construção, dos seus materiais e das suas partes após a demolição”, a “durabilidade das obras de construção” e a “utilização, nas obras de construção, de matérias-primas e materiais secundários compatíveis com o ambiente”.

Tão importante como a produção e utilização racional da energia, é a energia que se estima ser incorporada nos materiais e produtos ao longo dos seus ciclos de vida, por via das matérias-primas extraídas, processo de fabrico, transporte, desempenho, durabilidade e condições de eliminação. Desta forma, o desenvolvimento de novos materiais e produtos com menor incorporação de energia e menor impacte ambiental beneficiará do esforço de valorização de resíduos, do incremento de durabilidade dos sistemas, bem como do respetivo aumento de eficiência e desempenho.

### **1.3 Objetivos do Trabalho**

Vimos que a conceção ecológica dos produtos constitui um elemento essencial da estratégia comunitária, seguindo uma abordagem preventiva que visa otimizar o desempenho energético-ambiental dos produtos, sem comprometer as respetivas características funcionais. Neste contexto, é fundamental estudar a viabilidade de aplicação de novos materiais e produtos no desenvolvimento de soluções de construção mais sustentáveis, dando expressão ao novo conceito de edifícios passivos.

Os isolamentos térmicos assumem um papel importante na gestão racional de energia, contribuindo para reduzir as necessidades de aquecimento e de arrefecimento do ambiente interior. Por sua vez, os isolamentos acústicos minimizam os efeitos negativos provocados pelo ruído/vibração, contribuindo para o aumento do conforto do espaço interior e, desta forma, para a melhoria da qualidade de vida das populações.

A nível nacional, são vários os materiais sustentáveis já empregues na construção civil, existindo ainda uma enorme oportunidade para o desenvolvimento de novas soluções e novos

materiais mais ecológicos que coloquem o país num patamar de excelência ao nível da eco-edificação.

Assim, o presente trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma solução de painel de parede (eco-painel) com um revestimento constituído por madeira OSB preenchida com palha ou casca de arroz (Figura 1.1). Em termos tecnológicos, importa determinar as propriedades físicas e mecânicas, higrotérmicas e acústicas, de durabilidade e reação ao fogo da solução proposta, bem como evidenciar a respetiva eco-eficiência. O presente trabalho incidiu, essencialmente, na caracterização térmica e acústica da solução, bem como na comparação destas propriedades com as obtidas em soluções equivalentes constituídas por lâ de rocha. Uma avaliação do ciclo de vida destas soluções, foi ainda objeto deste trabalho.

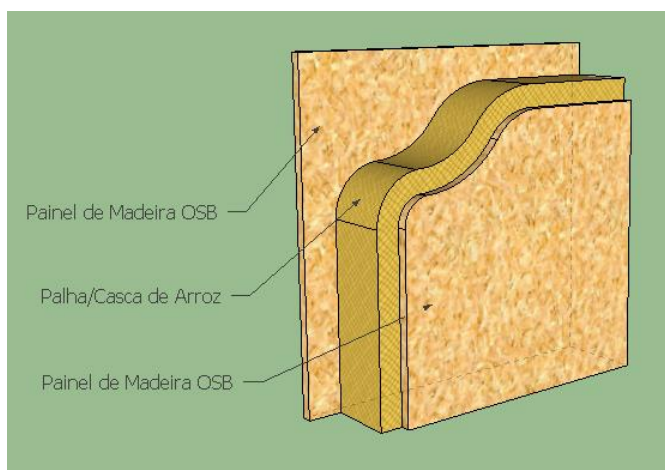


Figura 1.1 – Esquema representativo do painel de parede estudado.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Considerações Gerais

Assistimos hoje a uma crescente preocupação da Europa com a gestão de recursos, em particular dos naturais e não renováveis, às quais se associam preocupações ambientais, económicas e sociais. A este respeito, sabe-se que o setor da construção é responsável por enormes impactos associados ao consumo de matérias-primas e energia, tornando a construção sustentável num tema de enorme relevância. A importância da sustentabilidade e da ecoeficiência está hoje bem patente em vários documentos estratégicos das políticas europeias e nacionais, como já foi referido a propósito da Estratégia Europa 2020, do novo Regulamento dos produtos da construção (Regulamento (UE) n.º 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 9 de Março de 2011 [3]) e da criação de um quadro que defina os requisitos de conceção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia (Diretiva 2009/125/EC do Parlamento e do Conselho de 21 de Outubro de 2009 [2]). Para além disso, a construção sustentável envolve várias áreas do conhecimento, devendo proporcionar, para além do uso eficiente de recursos e do menor impacto ambiental, elevados níveis de qualidade e conforto aos utilizadores. É crucial, por isso, investir no desenvolvimento de produtos e processos de alto valor tecnológico, capazes de serem valorizáveis pelo mercado concorrencial.

Todas as atividades humanas são geradoras de resíduos, com potenciais consequências para a saúde humana e para o meio ambiente. A este respeito, temos assistido a um enorme esforço da Europa no sentido de melhorar a eficácia da gestão dos resíduos industriais, não apenas com o objetivo de reduzir o impacto ambiental das respetivas atividades, mas também com o objetivo de explorar o valor latente nos resíduos [4]. A agricultura e a indústria transformadora associada não são exceção, gerando anualmente enormes quantidades de resíduos e subprodutos com potencial de valorização.

O Baixo Mondego é uma região com enorme tradição na produção de arroz e na indústria que lhe está associada, gerando assim, grandes quantidades de resíduos anualmente. Contudo, a produção de arroz a nível nacional não se limita ao Baixo Mondego, sendo igualmente expressiva em outras duas grandes regiões, o Vale do Tejo e Sorraia e o Vale do Sado, o que faz com que o aproveitamento destes resíduos possa fazer parte de uma estratégia nacional [5].

Apesar de a legislação sobre a gestão de resíduos de biomassa ser escassa e não estar estabilizada, tem havido uma evolução no sentido de promover o seu aproveitamento para fins energéticos (Decreto-Lei n.º 179/2012, de 3 de Agosto [6]). Os resíduos das indústrias agrícolas resultantes das atividades de exploração e processamento de matérias-primas têm forte potencial de utilização como biomassa para a produção de energia. A 22 de Março de 2007, foi proposto em Assembleia da República, através do Projeto de Resolução n.º 199/X, a intenção de apontar para uma maior valorização da biomassa agrícola, contribuindo assim para a redução da dependência da biomassa florestal.

## 2.2 Cultura de Arroz no Baixo Mondego

O Baixo Mondego é uma região NUTS III do litoral da região centro do País, com uma área de cerca de 2062 km<sup>2</sup>, e que compreende oito municípios: Coimbra, Cantanhede, Condeixa-a-Nova, Figueira da Foz, Mira, Montemor-o-Velho, Penacova e Soure. Neste sistema urbano policêntrico evidencia-se o importante eixo de desenvolvimento Coimbra-Figueira da Foz, estruturador do território regional, e de maior concentração de atividade económica, em particular dos serviços, e em menor grau da indústria. Nesta região, o território designado por Baixo Mondego apresenta uma forte componente agrícola [7].

Esta região corresponde a uma extensa planície aluvionar, os solos são férteis e de textura franco limosa e franco argilo-limosa, atravessada longitudinalmente pelo Rio Mondego, o maior rio totalmente nacional, de maior bacia hidrográfica e de maior escoamento anual médio. O perímetro de rega do Baixo Mondego é constituído pelo Vale Central, entre as cidades de Coimbra e Figueira da Foz, e pelos vales secundários dos afluentes do Rio Mondego, perfazendo uma área total de cerca de 13.000 ha [8].

Destacando agora a cultura de arroz, esta foi introduzida na região do Baixo Mondego, mais concretamente no concelho de Montemor-o-Velho, no reinado de D. Dinis (1279-1325), tendo nessa altura sido concedidas terras àqueles que tinham intenção de cultivá-las. A área de cultivo de arroz ocupa atualmente 56% da área total deste Vale, o que efetiva cerca de 7.000 ha. O número total de agricultores do Baixo-Mondego ronda os 6300 [9], contudo o número de pessoas dependentes desta atividade económica é bem superior, por via dos respetivos agregados familiares.

O arroz é o segundo cereal mais cultivado no mundo. Trata-se de um dos cereais mais consumidos, revelando-se como o alimento principal para mais de metade da população [5]. Em termos de cultivo, o arroz tem um ciclo vegetativo de 5 meses, compreendido entre maio e setembro, altura em que é colhido. No caso do Baixo Mondego, são produzidas anualmente aproximadamente 30.000 t de arroz, gerando lucros na região de cerca de 6.000.000,00€, um valor bastante significativo quando comparado com outros setores da atividade económica da

região [10]. Para além do valor económico que esta atividade representa, há um valor cultural associado à tradição da cultura do arroz nesta região, que influencia outras atividades de natureza social e gastronómica.

Apesar do exposto, o processo de transformação do arroz, desde a colheita do cereal até à obtenção do produto acabado, origina resíduos de valor económico e nutritivo reduzido [11]. No Baixo Mondego produz-se anualmente cerca de 21.000 t de palha (3t/ha), sendo esta colhida entre setembro e outubro [10]. Atualmente, o aproveitamento da palha de arroz destina-se, em grande parte, ao revestimento de espaços de permanência de animais, sendo vendida para as explorações agropecuárias da região e, a parte remanescente, queimada e/ou envolvida no solo. A palha é vendida normalmente em fardos paralelepípedicos com cerca de 18 kg, com preços que podem variar entre os 0,80 € e 1,00 €, de acordo com informação recolhida junto dos produtores. Outro dos resíduos que advém da cultura do arroz é a casca (0,03 €/kg), que é produzida pela indústria transformadora de arroz aquando do descasque dos grãos.

Como foi exposto anteriormente, para além da região do Baixo Mondego existem outras duas regiões com produção orizícola, o Vale do Tejo e Sorraia e o Vale do Sado, que em conjunto permitiriam garantir as quantidades necessárias para a exploração destes resíduos no setor da construção.

## **2.3 Construção Sustentável**

A indústria da construção está associada a enormes impactes ambientais, sendo responsável pela produção de 40% das emissões de dióxido de carbono, pela utilização de 35% dos recursos ambientais e pela produção de 38% dos resíduos a nível mundial [12]. A crescente preocupação da sociedade com a deterioração do ambiente e com a exploração intensiva dos recursos naturais, invocam a necessidade de uma construção mais sustentável, nomeadamente no que diz respeito ao consumo energético. Desta forma, é cada vez mais urgente considerar os impactes associados à construção de edifícios, bem como procurar alternativas que permitam minimizá-los. A este respeito, importa referir que o recurso a subprodutos e resíduos de vários tipos para aplicação no setor da construção não é nova, tendo vindo a assumir progressivamente maior expressão.

### **2.3.1 Utilização de Resíduos Industriais**

Atualmente existem diversos exemplos de projetos pioneiros que propõem a utilização de materiais e produtos mais sustentáveis na construção, nomeadamente no que diz respeito à integração de resíduos industriais.

Um dos primeiros resíduos a serem aproveitados foram os pneus usados. O uso de borracha de pneu moído, e a sua incorporação em misturas betuminosas para a concepção de estradas, remonta a 1960 [13].

Também a incorporação de resíduos em betões tem sido alvo de diversos estudos, como por exemplo a análise da viabilidade do uso de resíduos de vidro [14][15]. Variando a proporção dos resíduos e a sua granulometria, verificou-se que até uma percentagem de substituição da ordem dos 50% do agregado, o desempenho dos betões em termos de resistência e durabilidade é aceitável. Ainda no que diz respeito à incorporação de resíduos em betão, foi estudada a influência das condições de cura no desempenho mecânico de betões contendo agregados de plástico reciclado [16].

O comportamento de argamassas de cimento com materiais com potencialidade pozolânica também tem sido analisado. Introduzidos na forma de pó, poderão permitir a redução da quantidade de ligante, o que apresenta claras vantagens no que diz respeito às emissões de dióxido de carbono e aos consumos energéticos decorrentes da produção do cimento. Neste contexto, surgem estudos com resíduos de cerâmica [17, 18], cinzas volantes [19, 20], caulinite [21], escórias de alto-forno [20, 22, 23], pó de pedra [24, 25], cinza de cana-de-açúcar [26], vidro [20, 27], plástico [28], resíduos sólidos urbanos [29] e desperdício da indústria do papel [30]. Materiais como os cerâmicos [31], vidro [32], folhas de bambu [33], cortiça [34, 35], borracha [36] e espuma de poliuretano [37], também têm sido estudados enquanto substitutos de agregado ou como fibras. Recentemente, foi realizado um estudo sobre a incorporação de cinza de palha de arroz em argamassas [38]. Os resultados obtidos mostraram um rápido aumento de resistência à compressão em função do teor de cinzas incorporado.

Outro tipo de argamassas, contendo cal e resíduos têm sido estudadas com a preocupação de desenvolver produtos de elevada eficiência energética e reduzido impacte ambiental, nomeadamente em processos de reabilitação. No caso da cal aérea encontramos alguns trabalhos relacionados com a incorporação de resíduos cerâmicos [39, 40], cinzas de casca de arroz [41] e alguns materiais orgânicos [42]. No que diz respeito à cal hidráulica, existem menos referências a que tenha sido feita a incorporação de resíduos para produção de argamassas. Alguns exemplos são a incorporação de cinzas volantes, metacaulino e gesso anidro [43], resíduos de plástico - PET [43], fibrocimento em pó [44] e resíduos provenientes da indústria metalúrgica [45].

Também os resíduos da própria indústria do setor da construção, designados por resíduos de construção e demolição (RCD), têm sido alvo de intenso estudo com o objetivo diminuir a procura de novas matérias-primas e o desenvolvimento de novos materiais e aplicações [46, 47].

### 2.3.2 Utilização de Recursos Naturais e Resíduos de Biomassa

Em Portugal, existe um importante mercado em expansão que assenta na utilização de recursos naturais, tal como a cortiça. Apesar destes serem, genericamente, produtos de elevada qualidade e desempenho, são normalmente também produtos de elevado custo. A escassa orientação para o uso destes materiais naturais, faz com que estes sejam apenas utilizados em construções cujos critérios e solicitações de projeto sejam mais exigentes.

Com exceção da cortiça expandida, que se baseia num material totalmente reciclável e renovável, a maior parte dos outros materiais de isolamento estão associados a efeitos negativos, quer para a saúde quer para o ambiente. O poliestireno, por exemplo, contém aditivos anti-oxidantes e retardadores de ignição, e a sua produção envolve várias etapas de geração de benzeno e clorofluorcarbonetos, além de libertar gases tóxicos quando submetido ao fogo [48]. É importante, por isso, efetuar a avaliação de ciclo de vida de todos os materiais de isolamento, mesmo os de base natural [49].

Nos últimos anos, um conjunto de investigações tem-se centrado no desenvolvimento de novos materiais de isolamento térmico à base de produtos naturais, tais como linho ou fibras de cânhamo [50], fibras da haste de algodão [51], resíduos sólidos do fabrico de papel e casca de milho [52] ou resíduos de casca de durião e coco [53].

Relativamente aos materiais de isolamento compostos por linho ou fibras de cânhamo, embora apresentem boas propriedades de isolamento, não atingem o desempenho das fibras de vidro ou de lã de rocha, de menor custo [50].

No caso do material feito à base de fibra de haste de algodão sem aditivos químicos [51], foi estudado o efeito da massa volúmica da placa e do teor de humidade das fibras de algodão na condutibilidade térmica. Os resultados mostraram que a placa com uma massa volúmica de 150 - 450 kg/m<sup>3</sup> apresenta valores de condutividade térmica no intervalo de 0,0585 - 0,0815 W/(m.°C). De referir, ainda, que estes valores de condutibilidade térmica são inversamente proporcionais à massa volúmica da placa.

Novas placas de compósitos com baixa condutibilidade térmica produzidas a partir de uma mistura de resíduos sólidos do fabrico de papel e casca de milho foram investigadas [52]. Os efeitos da razão de resíduos de papel / casa de milho sobre as propriedades das placas foram analisados. Os resultados mostram que a massa volúmica dos aglomerados diminui com o aumento da quantidade de casca de milho adicionado à mistura, o que leva a uma diminuição da condutividade térmica do produto final. Pelo contrário, a maior quantidade de resíduos de papel adicionados à mistura produziu placas mais fortes. A condutibilidade térmica situou-se no intervalo de 0,1388 - 0,1552 W/(m.°C) para uma massa volúmica de 789 ± 16 kg/m<sup>3</sup>.

Num outro trabalho, foram desenvolvidos aglomerados com baixa condutibilidade térmica com casca de durião e casca de coco [53]. Estudando os parâmetros de proporção da mistura de casca de durião e coco, observou-se que a relação de mistura ideal é de 10:90 (em peso) respetivamente, com uma massa volúmica de 856 kg/m<sup>3</sup>, obtendo-se um composto com condutibilidade térmica de 0,0764 - 0,1254 W/(m.°C). Os investigadores concluíram que os novos aglomerados têm uma condutibilidade térmica mais baixa, o que pode representar uma grande economia de energia quando usado como material de isolamento.

Um resumo das propriedades de isolamento térmico em função da massa volúmica e espessura foi sistematizado no Quadro 2.1 [54].

Quadro 2.1 – Propriedades de isolamento térmico de diferentes agro-resíduos em função da massa volúmica e espessura [54]

Resíduo	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	Espessura (mm)	Condutibilidade térmica W/(m.°C)
Haste de fibra de algodão	150 - 450	25	0,058 - 0,0815
Resíduo de papel/casca de milho	773 - 795	3,5	0,1388 - 0,1552
Casca de durião e coco	311 - 856	10	0,0764 - 0,1254

Num estudo recente foi investigado um aglomerado de carolo/sabugo de espiga de milho como uma possível solução sustentável para diferentes aplicações de construção [55]. Resultados de microscopia eletrónica evidenciaram uma microestrutura alveolar semelhante à apresentada pelo poliestireno extrudido ou cortiça. O estudo permitiu, ainda, verificar o benefício de isolamento acústico de pavimentos, quando submetido a ruídos de percussão, onde foi aplicado aglomerado de carolo/sabugo de espiga de milho no pavimento. O ganho de isolamento acústico a sons de impacto foi estimado em cerca de 30 dB.

Num estudo da *California Air Resources Board* [56], foram identificados vários problemas relacionados com o destino final da palha de arroz. Este resíduo tem principalmente dois destinos, que são a queima e a incorporação no solo. Com a queima são lançadas na atmosfera enormes quantidades de dióxido de carbono. Sendo o teor de carbono da palha de arroz cerca de 40 %, a queima de por exemplo 500 mil t de palha seria responsável por lançar na atmosfera 200 mil t de dióxido de carbono. Por outro lado, a incorporação da palha no solo liberta metano, cujas emissões são mais prejudiciais do que os subprodutos de queima. Este estudo aponta, ainda, para novas oportunidades de valorização da palha de arroz, nomeadamente o seu uso para o controlo de erosão, produção de cogumelos, produção de materiais bio-compósitos (painéis feitos com palha de arroz e cimento ou plástico) e construção de edifícios (fardos de palha).



As primeiras construções com palha datam do final do século XVII, nos EUA, quando as máquinas de enfardamento foram inventadas [57]. Como não havia árvores, a palha era o único material disponível para os colonos europeus nas planícies do Nebraska que, assim, usavam este material nas suas edificações.

O estudo de uma construção feita a partir de fardos de palha de trigo, “*Straw Bale Cabin*”, situado em Yorkshire (Figura 2.1), revela que os níveis de isolamento térmico são o dobro do exigido pelos regulamentos daquele país, apontando também para uma economia de energia imediata de 50% [58]. As paredes de fardos de palha quando rebocadas com barro ou cal, podem reduzir a necessidade de aquecimento e arrefecimento, moderando as temperaturas interiores, uma vez que têm grande capacidade de armazenar energia. Ao mesmo tempo, a construção com o recurso a fardos de palha pode reduzir significativamente a quantidade de energia necessária para a construção de uma parede, redução essa que será próxima dos 90% em relação às paredes comuns em alvenaria. Por fim, cada 10 kg de palha de trigo absorve aproximadamente 14 kg de dióxido de carbono à medida que cresce, mantendo este sequestrando nas paredes durante a vida do edifício.



Figura 2.1 – Exemplo de uma construção feita a partir de fardos de palha de trigo, *Straw Bale Cabin*, situado em Yorkshire, Reino Unido [58].

Frequentemente associado à construção sustentável e à utilização de palha de cereais está a utilização de madeira. Num estudo realizado [59], descreve-se que a utilização de madeira na construção de casas na Holanda poderá reduzir para metade as emissões de carbono naquele país.

## 2.4 Exigências Funcionais

Neste trabalho pretendeu-se desenvolver uma solução de parede inovadora, capaz de conferir conforto higrotérmico e acústico no interior de habitações. As paredes são parte integrante de qualquer construção, seja ela moderna ou antiga, e têm vindo a evoluir com o próprio setor. No passado, as paredes eram feitas de alvenaria de pedra ou alvenaria maciça e

desempenhavam uma função estrutural, não existindo qualquer outro elemento de suporte. Com a utilização do betão armado, as paredes deixaram de ter um papel resistente e passaram a ser elementos de preenchimento. Começaram, então, a ser executadas com recurso a materiais mais aligeirados e a serem melhoradas as suas características funcionais a outros níveis.

Várias exigências funcionais são atribuídas às paredes, nomeadamente as que dizem respeito à segurança e conforto. Assim, em termos de segurança, uma solução de parede deve ser caracterizada relativamente à sua estabilidade estrutural, comportamento em situação de incêndio e risco de intrusão. Em termos de conforto, é essencial caracterizar o comportamento higrotérmico e acústico, mas também o aspeto visual e tátil.

Na conceção de novas soluções de parede, com recurso a materiais inovadores, é necessário assegurar as referidas exigências técnicas, mas, simultaneamente assegurar que se trata de uma solução sustentável e economicamente viável. Importa ainda referir, que estas soluções devem apresentar custos de execução e manutenção apropriados, bem como adequabilidade a diferentes sistemas construtivos. No que a esta dissertação diz respeito, dar-se-á relevo ao estudo das propriedades responsáveis pelo conforto térmico e acústico, bem como aos fatores responsáveis pelo seu nível de sustentabilidade.

A transferência de calor pode envolver diferentes mecanismos, nomeadamente condução, convecção e radiação. A condução é um dos meios de transferência de calor que, geralmente, ocorre em materiais sólidos. Por sua vez, a convecção ocorre em fluídos, envolvendo o seu movimento. A radiação envolve emissão, propagação e absorção de radiação infravermelha. Neste caso, a transferência de energia ocorre sem contacto físico entre corpos.

O objetivo de um material de isolamento térmico é reduzir ou anular um ou mais destes mecanismos de transferência de calor. No caso da condução, em regime permanente, verifica-se que este mecanismo está fortemente associado ao coeficiente de condutibilidade térmica do material.

O coeficiente de condutibilidade térmica é uma propriedade característica de um material homogéneo que representa a quantidade de calor expressa por unidade de tempo que atravessa uma camada de espessura e de área unitárias desse material devido a uma variação de temperatura unitária entre as suas duas faces [60]. Assim, a condutibilidade térmica caracteriza a maior ou menor facilidade de transferência de calor, ou seja, de condução de calor por parte dos materiais. O inverso da condutibilidade térmica multiplicado pela espessura da camada é, designado por resistência térmica. Convencionalmente, consideram-se como isolantes térmicos os materiais e produtos que apresentam uma condutibilidade térmica inferior a  $0,065 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  e uma resistência térmica superior a  $0,03 \text{ (m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$  [60].

No que diz respeito ao isolamento acústico a sons aéreos, este envolve a transferência de vibrações através da parede que separa dois ambientes. O isolamento da parede depende da forma como os painéis que a constituem vibram. Verificam-se, assim, quebras do isolamento associadas a modos de vibração própria das paredes, e à propagação de vibrações ao longo desses mesmos panos de parede. De igual modo, o isolamento depende da energia incidente e do seu conteúdo em frequência. A energia incidente, por seu lado, depende do tipo de fonte e dos modos de vibração própria dos espaços confinantes.

## 3 MATERIAIS E TÉCNICAS

### 3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são descritas as principais características dos materiais e técnicas utilizados no presente estudo, bem como fundamentadas a escolha de alguns parâmetros e condições de ensaio.

Com este trabalho, pretendeu-se desenvolver uma solução de painel de parede, composta por madeira e palha ou casca de arroz, com o objetivo final de definir uma solução sustentável, com propriedades de isolamento térmico e acústico adequadas. O desempenho destes sistemas foi, ainda, comparado com o de soluções compostas por madeira e lã de rocha.

Para determinação da condutibilidade térmica nas diferentes soluções foi utilizado o equipamento  $\lambda$  -Meter EP500e. Por sua vez, o índice de isolamento sonoro foi determinado recorrendo a câmaras acústicas e a instrumentação adequada ao estudo do isolamento a sons aéreos de elementos verticais. A execução dos diversos ensaios exigiu, ainda, a preparação de provetes com dimensões adequadas aos equipamentos.

Ainda no âmbito deste capítulo, será descrita a metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV) utilizada para a quantificação do desempenho ambiental e energético dos painéis em estudo.

### 3.2 Materiais

#### 3.2.1 Palha e Casca de Arroz

Neste trabalho foram utilizados subprodutos da cultura do arroz, da espécie *Oryza sativa L.*, subespécie *Japónica*, provenientes do Baixo Mondego. A palha é proveniente de uma exploração agrícola situada no vale secundário, o vale do Arunca, enquanto a casca foi cedida por uma empresa de transformação de arroz do Baixo Mondego.

A palha de arroz é um colmo simples, tipo de caule encontrado nas gramíneas, cilíndrico, com 3 - 5 mm de diâmetro e 60 - 85 cm de comprimento, sendo constituída maioritariamente por 32% celulose, 29,9 % hemicelulose e 18,8% lignina [61].

A casca de arroz é uma capa lenhosa do grão, de dimensão 3 – 5 mm, dura, composta em média por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica, dependendo da variedade semeada, do clima, do solo e da localização geográfica [62]. Em termos de composição química a casca e a palha de arroz são praticamente iguais, com cerca de 38% de carbono, 37% de oxigénio e 5% de hidrogénio, sendo os restantes compostos nitrogénio e enxofre [63]. A palha e casca de arroz podem apresentar uma variação significativa da massa volúmica, como se descreve no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Massas volúmicas de casca e palha de arroz (kg/m<sup>3</sup>) [63]

	<b>Palha de arroz</b>	<b>Casca de arroz</b>
<b>Solto</b>	50 - 120	73 - 112
<b>Vibrado</b>	-	122 - 145

O estudo da condutibilidade térmica utilizou uma caixa revestida com madeira OSB. No interior desta caixa foi introduzida uma determinada massa de palha, casca, ou lã de rocha. A variação do volume da caixa permitiu obter resultados para diferentes massas volúmicas do material em estudo.

Para testar a influência da humidade da palha (material mais sujeito à presença de humidade) na condutibilidade térmica, alguns dos ensaios foram conduzidos com material seco. A palha foi seca em estufa à temperatura de 60° C até obter massa constante, e verificou-se que o teor de humidade da palha era cerca de 8,5 % em peso, de acordo com cálculos apresentados em anexo (Anexo A).

Para testar uma massa volúmica de palha superior ao limite máximo obtido com a granulometria original, diminuindo desta forma os espaços vazios e aumentando a quantidade de material isolante, optou-se por sujeitar a palha a um processo de trituração. O mesmo não foi considerado necessário para o caso da casca, onde já era possível chegar a massas volúmicas de maior ordem de grandeza.

Nos ensaios de isolamento acústico, devido à necessidade de manter constantes as dimensões do provete, a variação de massa volúmica foi feita através do incremento de massa de palha e casca.

As quantidades utilizadas em cada ensaio estão resumidas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Quantidades de palha e casca de arroz utilizadas nos ensaios térmicos e acústicos

Provete	Material	Ensaio Térmico (g)	Ensaio Acústico (g)
OMH304A/13	Palha	1398	-
OMH304A/13	Palha	2080	-
OMH000A/14	Palha seca	1897	-
OMH001A/14	Palha triturada	4100	-
OMH332A/13	Casca	6031	-
ACU001/13	Palha	-	5180
ACU002/13	Palha	-	7760
ACU003/13	Palha	-	10350
ACU004/13	Casca	-	21570
ACU005/13	Casca	-	23820

### 3.2.2 Lã de Rocha

A lã de rocha é produzida a partir de uma mistura de rochas vulcânicas e rochas sedimentares, nomeadamente basalto e calcário. Depois de fundidas, estas são transformadas em filamentos que, aglomerados com soluções de resinas orgânicas, permitem o fabrico de produtos leves e flexíveis ou até rígidos, dependendo do grau de compactação. A densidade da lã de rocha pode variar entre os 30kg/m<sup>3</sup> e os 300kg/m<sup>3</sup>. Com um ponto de fusão próximo dos 1200°C, este material tem excelente comportamento ao fogo [64]. Sendo um material usado tanto para isolante térmico como acústico, é uma boa referência de comparação com a solução de eco-painel estudada.

Os ensaios de condutibilidade térmica e de isolamento acústico foram realizados sobre painéis de madeira e lã de rocha, utilizando para isso lã de rocha de 3 diferentes origens: (i) RockTerm - TERMOLAN, (ii) RockWool - XFLOC e (iii) Lapinus. As quantidades utilizadas em cada ensaio estão resumidas no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Quantidades de lã de rocha utilizadas nos ensaios térmicos e acústicos

Provete	Lã de rocha	Ensaio Térmico (g)	Ensaio Acústico (g)
OMH371A/13	RockTerm - TERMOLAN	4900	-
OMH374A/13	RockWool - XFLOC	4900	-
OMH378A/13	Lapinus	4900	-

Provete	Lã de rocha	Ensaio Térmicos (g)	Ensaio Acústicos (g)
ACU006/13	RockTerm - TERMOLAN	-	20700
ACU007/13	RockWool - XFLOC	-	20700
ACU008/13	Lapinus	-	20700

### 3.2.3 Madeira OSB

Os painéis de madeira OSB (do inglês, *oriented strand board*) são painéis de aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas. Estes painéis são normalmente compostos por três a cinco camadas cruzadas de tiras de madeira, tendo estas dimensão média de 10 - 25 mm. São aglomeradas sob o efeito de calor e pressão, usando produtos que tornam estas placas de madeira inertes à água e com grande resistência estrutural. As espécies mais usadas no fabrico de estruturas lameladas-coladas na Europa são o choupo, o abeto e o pinheiro. Nos ensaios realizados, foram usadas placas de madeira OSB com 15,6 mm de espessura e com uma massa volúmica média de 593 kg/m<sup>3</sup>.

## 3.3 Condições Experimentais

### 3.3.1 Ensaio Térmico

Na determinação da condutibilidade térmica foi utilizado o equipamento  $\lambda$ -Meter EP500e (ver Figura 3.1), que utiliza o método da placa quente protegida. Este equipamento permite obter valores absolutos de condutibilidade e resistência térmica, para materiais de isolamento térmico e outros produtos [64]. Os ensaios foram conduzidos de acordo com a orientação das normas ISO 8302, EN 1946-2, EN 12664, EN 12667 e EN 12939.

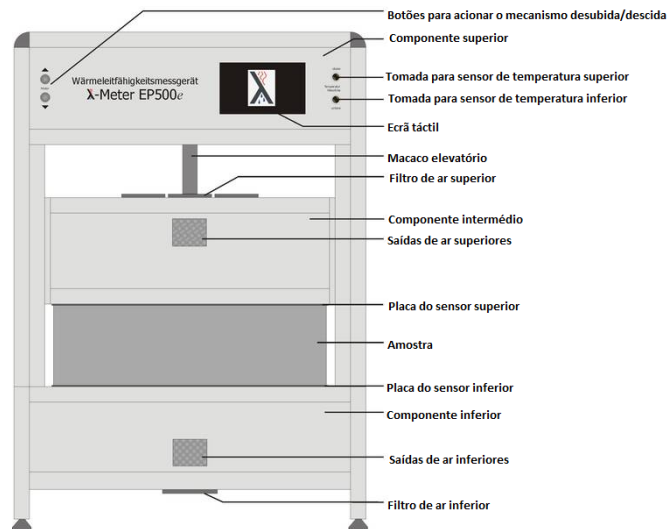


Figura 3.1 – Equipamento  $\lambda$ -Meter EP500e [64].

O ensaio de condutibilidade térmica tem em conta a medida de espessura,  $d$ , da amostra inserida, a diferença de temperatura,  $\Delta T$ , aplicada sobre a amostra e o fluxo de calor,  $Q$ , que é equivalente à potência elétrica,  $P$ , do aquecimento. A condutibilidade térmica,  $\lambda$ , é determinada com base na área de medição e, para uma condução térmica unidirecional, segue a expressão (1) [65].

$$\lambda = \frac{Q \times d}{A \times \Delta T} \quad (1)$$

O equipamento está preparado para efetuar ensaios em amostras de dimensão plana 500 mm  $\times$  500 mm e altura máxima de 200 mm. A área de medição da condutibilidade térmica está localizada no centro da amostra, numa área de 200 mm  $\times$  200 mm, como representado na Figura 3.2.



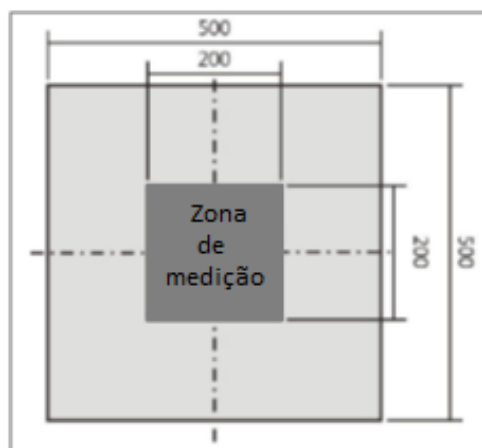


Figura 3.2 – Definição da zona de medição.

### 3.3.2 Condições de Ensaio Térmico

O equipamento  $\lambda$ -Meter EP500e permite verificar a condutibilidade térmica para diferentes temperaturas de ensaio. Tendo-se estipulado uma temperatura média de 23° C ( $\lambda_{23}$ ) e uma diferença de temperaturas entre pratos de 15°C. A temperatura e a humidade relativa ambiente foram medidas com um termo-higrómetro. A espessura da amostra foi medida pelo equipamento para uma pressão de contacto de 2500 Pa.

Durante o ensaio, o equipamento mede a condutibilidade térmica e a resistência térmica a cada 30 segundos, terminando o ensaio de acordo com um critério de estacionariedade (variação da condutibilidade térmica < 1% num período de tempo de 75 minutos).

### 3.3.3 Ensaio Acústicos

Na medição do índice de isolamento sonoro, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Câmaras acústicas móveis construídas nas instalações do ITeCons (ver esquema na Figura 3.3). As câmaras horizontais são adjacentes e comunicam entre si através de uma abertura de 10 m<sup>2</sup>, onde é inserido o provete de ensaio. A câmara fixa tem um volume de 203,98 m<sup>3</sup>, ao passo que a câmara móvel tem 181,54 m<sup>3</sup>;
- Sonómetros integradores do tipo 2260, com microfones tipo 4189 da marca *Brüel & Kjaer*;
- Calibradores acústicos do tipo 4231, da marca *Brüel & Kjaer*;
- Fontes de ruídos aéreos, do tipo OMNIPOWER 4292, da marca *Brüel & Kjaer*;
- Termo-higrómetro.

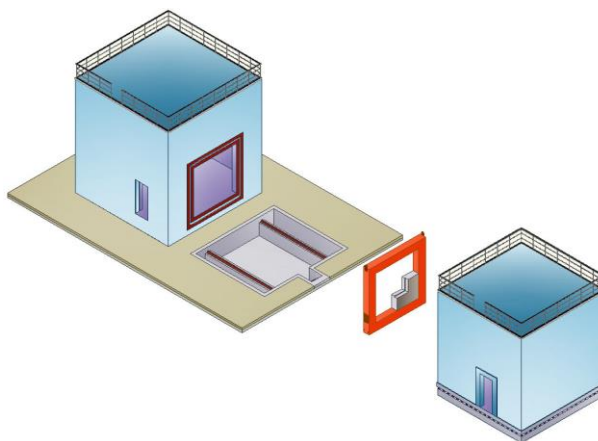


Figura 3.3 – Esquema geral do sistema de câmaras horizontais móveis [66].

### 3.3.4 Condições de Ensaio Acústico

O ensaio é realizado de acordo com a orientação das normas ISO 10140-1, ISO10140-2, ISO 10140-4 e ISO 717-1. De forma sucinta, procedeu-se ao registo do nível sonoro na câmara emissora, em 5 posições de microfone e 2 posições de fonte; registo em simultâneo do nível sonoro na câmara recetora, em 5 posições de microfone e para as mesmas 2 posições de fonte no compartimento emissor; medição de ruído de fundo nas mesmas 5 posições de sonómetro no compartimento recetor (com a fonte desligada); e medição dos tempos de reverberação no compartimento recetor, considerando 1 posição de fonte e registando 2 decaimentos em 3 posições de microfone. A curva de isolamento sonoro normalizado é, posteriormente, determinada de acordo com uma curva de referência, e o respetivo isolamento determinado com base no valor dessa curva para a banda dos 500 Hz.

## 3.4 Definição dos Provetes

### 3.4.1 Ensaio Térmicos

Para a realização dos ensaios térmicos utilizou-se uma caixa de madeira revestida com placas de madeira OSB com dimensões compatíveis com o equipamento de ensaio e de volume variável (ver esquema da Figura 3.4). Esta caixa foi construída de forma a permitir variar a massa volúmica dos provetes, sendo constituída por duas partes que possibilitam o encaixe de uma na outra, permitindo a variação de altura efetiva de 100 - 200 mm (altura livre) por aperto de 4 parafusos nos respetivos vértices. De forma a garantir uma espessura constante da amostra, foram usadas várias alturas de calços para servir de batente, como ilustra a Figura 3.5. As massas volúmicas que foram adotadas para os ensaios térmicos com a palha situaram-se na gama de 29,1 kg/m<sup>3</sup> a 115,2 kg/m<sup>3</sup>. Nos ensaios com a casca, as massas volúmicas foram um pouco superiores, na gama de 125,7 kg/m<sup>3</sup> a 137,9 kg/m<sup>3</sup>. No caso da lã de rocha, utilizada como referência de comparação, os ensaios foram realizados apenas para uma massa volúmica de 120 kg/m<sup>3</sup>.

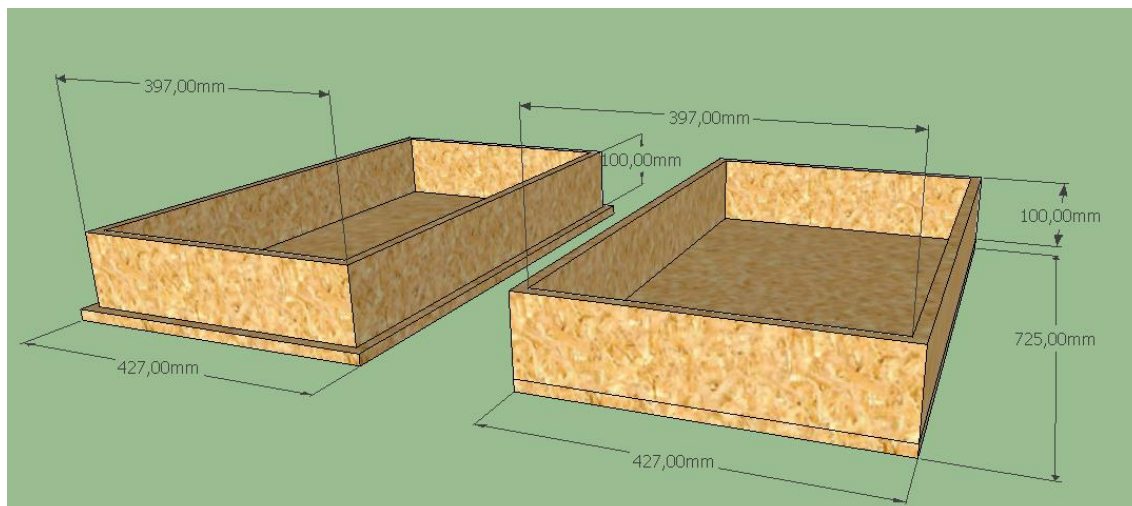


Figura 3.4 – Dimensões da caixa OSB utilizada nos ensaios térmicos.



Figura 3.5 – Pormenor de calço que permite garantir a espessura do provete constante.

### 3.4.2 Ensaios Acústicos

De um modo geral, os provetes a ensaiar nas câmaras do ITeCons são construídos no interior de um aro pré-fabricado (3160 mm × 3160 mm). Este aro apresenta uma abertura, onde é construído o provete de acordo com as exigências da norma NP EN 20140-3. Note-se, ainda, que o contacto com a estrutura das duas câmaras acústicas se realiza apenas através deste aro, não sendo o provete sujeito a qualquer pressão de aperto aquando da movimentação da câmara móvel. Por questões económicas, o estudo apresentado nesta dissertação foi conduzido sobre um aro de dimensões 1250 mm × 1500 mm, usado para ensaio de isolamento a sons aéreos de janelas e envidraçados, tal como se ilustra na Figura 3.6.



Figura 3.6 – Aro pré fabricado utilizado nos ensaios de isolamento a sons aéreos.

Assim, utilizou-se uma caixa de madeira revestida com placas de madeira OSB, com as dimensões indicadas na Figura 3.7. Esta caixa apresenta apenas uma abertura superior, que permite a introdução do material em estudo (palha, casca de arroz e lã de rocha). No final, esta abertura é fechada com uma tampa de madeira OSB. Esta caixa é instalada no aro de ensaio e, posteriormente, calafetada na periferia com lã de rocha. É, para além disso, revestida no contorno com silicone para impedir transmissões diretas de som através de eventuais zonas mais fracas.

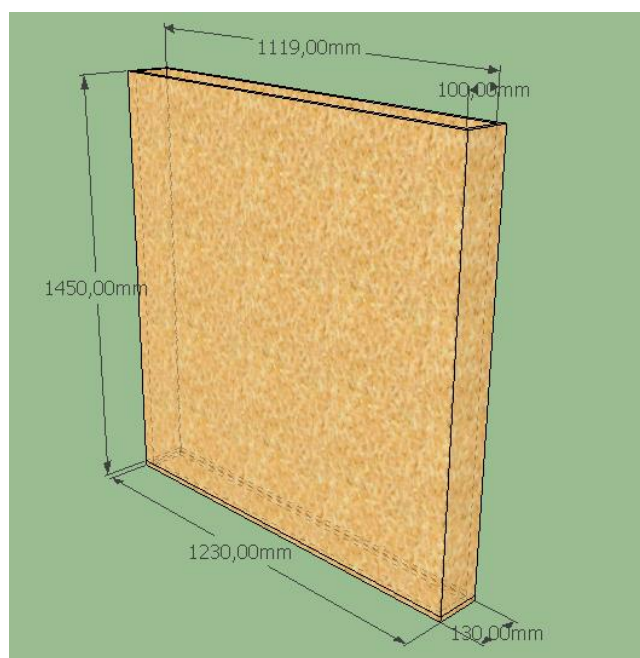


Figura 3.7 – Dimensões da caixa OSB utilizada nos ensaios acústicos.

### 3.5 Avaliação do Ciclo de Vida

#### 3.5.1 Metodologia Avaliação do Ciclo de Vida

A avaliação do ciclo de vida é uma metodologia que possibilita a análise de fluxos de entrada e saída (mássicos e energéticos) do ciclo de vida (CV) de um produto ou serviço, desde a extração das matérias-primas até ao seu fim de vida, de forma a quantificar e avaliar os seus potenciais impactes ambientais [67]. Esta metodologia baseia-se na análise de sistemas onde os processos fazem parte de um conjunto de subsistemas que trocam entradas e saídas entre si [68], permitindo, desta forma, identificar as áreas mais críticas ou as que necessitam de melhorias. A ACV é constituída por quatro fases fundamentais (Figura 3.8), nomeadamente:

- **Definição do objetivo e âmbito**, onde se expõe de forma clara a finalidade do estudo, bem como se descreve o sistema do produto/serviço, se define a unidade funcional e as fronteiras do sistema a avaliar e, ainda, se estabelece os dados necessários e os critérios de avaliação a considerar;
- **Inventário do CV**, onde se identificam e quantificam, de forma iterativa, todas as entradas e saídas de energia e de materiais do CV de um produto/serviço;
- **Avaliação de impactes do CV**, fase que tem como intuito identificar e avaliar os potenciais impactes ambientais relacionados com os fluxos de energia e materiais, identificados na fase de inventário, e facilitar a agregação e interpretação dos mesmos dados, de forma a auxiliar tomadas de decisão;
- **Interpretação**, onde os resultados das anteriores fases são analisados em conjunto, de acordo com os objetivos definidos, a fim de estabelecer conclusões, explicar limitações e propor recomendações [69].

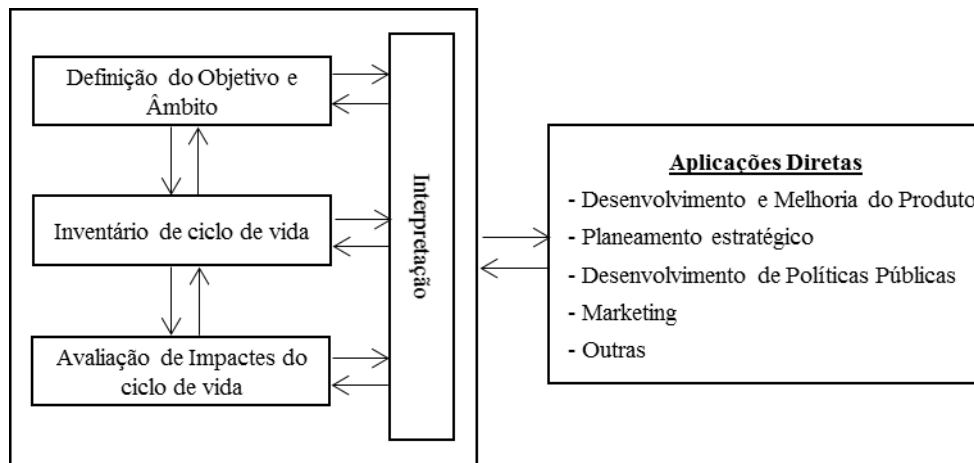


Figura 3.8 – Fases fundamentais da Avaliação de Ciclo de Vida (adaptado de [70]).

Esta metodologia encontra-se descrita pelas normas internacionais da família ISO 14000, principalmente, pela norma ISO 14040 e pela norma ISO 14044. Relativamente à aplicação da metodologia de ACV a produtos de construção e a edifícios, foi desenvolvido, recentemente, um conjunto de normas metodológicas publicadas pela Comissão Técnica 350- *Sustainability of construction works*, do Comité Europeu de Normalização (EN 15643, EN 15643-2, EN 15804, EN 15941, EN 15942 e EN 15978). O presente estudo, foi desenvolvido de acordo com as normas ISO anteriormente referidas e com a norma EN 15804, no que diz respeito à nomenclatura das etapas e módulos de informação do CV (Figura 3.9), bem como ao método de caracterização utilizado na avaliação de impactes do CV. Para a modulação do ciclo de vida e para o cálculo dos impactes recorreu-se ao *software SimaPro* (do Inglês “*System for Integrated Environmental Assessment of Products*”).

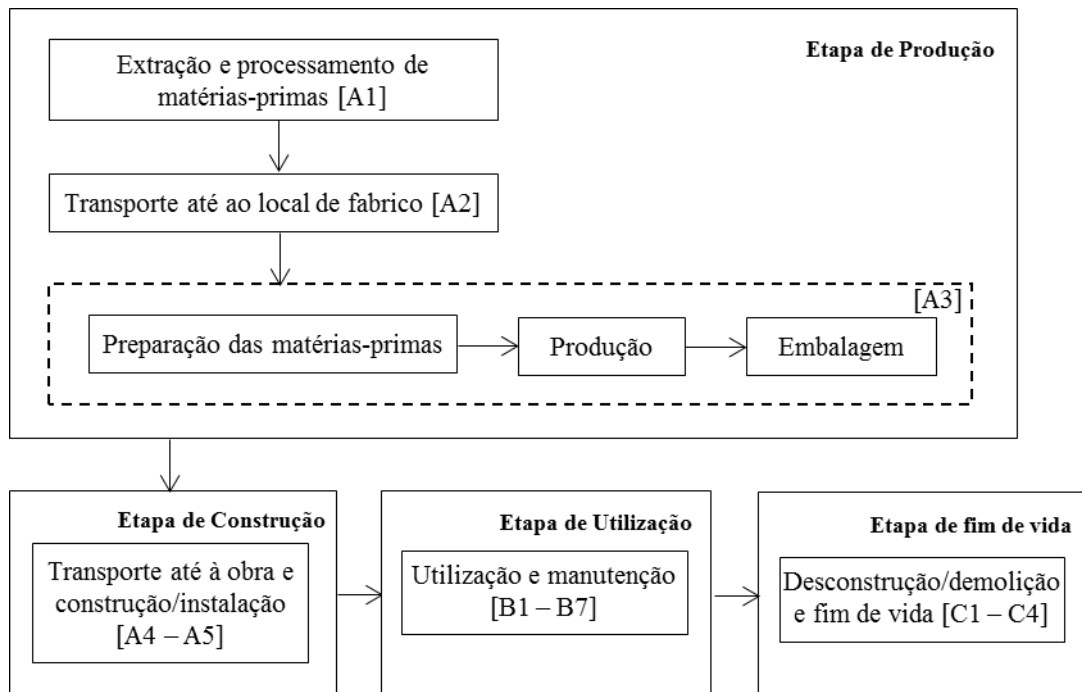


Figura 3.9 – Etapas gerais da Avaliação de Ciclo de Vida (adaptado de [69]).

### 3.5.1 Modelo e Inventário do Ciclo de Vida

- **Definição do objetivo e do âmbito**

Como referido anteriormente, o principal objetivo da presente dissertação consistiu no desenvolvimento e análise das propriedades de uma solução de painel de parede para compartimentação de espaços com preenchimento de palha ou casca de arroz, bem como na comparação das propriedades analisadas com as obtidas em soluções equivalentes com preenchimento de lã de rocha. Pelo exposto, verificou-se a necessidade de realizar uma avaliação do ponto de vista ambiental às soluções que apresentaram melhor desempenho térmico e acústico, a qual foi efetuada recorrendo à metodologia de ACV. Assim, o objetivo do estudo de ACV consistiu na quantificação e comparação do desempenho ambiental e energético da etapa de produção de três soluções de parede para compartimentação de espaços, constituídas por:

- Madeira OSB com preenchimento de palha de arroz (triturada);
- Madeira OSB com preenchimento de casca de arroz;
- Madeira OSB com preenchimento de lã de rocha.

Esta ACV incidiu no estudo experimental desenvolvido nas instalações laboratoriais do ITeCons, pelo que apenas foram considerados alguns fluxos de entrada como dados de inventário, tendo-se recorrido a uma base de dados, *Ecoinvent*, para preencher as lacunas de informação. Dadas as dificuldades em obter dados concretos sobre a produção de arroz no

Baixo Mondego, também se recorreu à base de dados *Ecoinvent* neste caso. Neste estudo foi considerada a extração e processamento das matérias-primas [A1], o transporte até ao local de produção [A2] e a produção dos painéis [A3] (Figura 3.10). De referir que não foram considerados no âmbito deste estudo a construção de infraestruturas e a produção de equipamentos. A unidade funcional selecionada foi 1 m<sup>2</sup> de painel de parede.

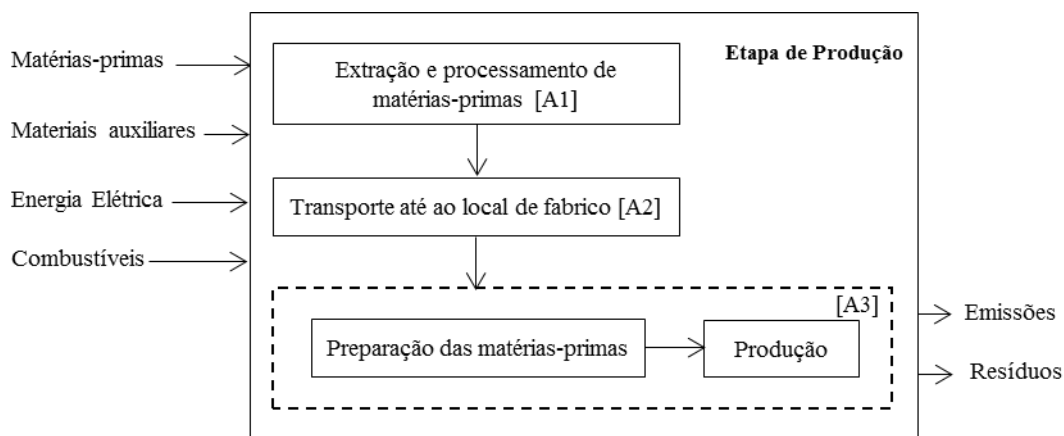


Figura 3.10 – Fluxograma do ciclo de vida (*cradle-to-gate*) de 1 m<sup>2</sup> de painel de parede.

- **Regras de alocação**

Na produção dos painéis em estudo, foram utilizados coprodutos provenientes da cultura de arroz, nomeadamente, palha e casca, o que faz da cultura de arroz um processo com múltiplas saídas. Para resolver esta questão de multifuncionalidade optou-se pela alocação dos impactes, ou seja, pela atribuição de parte dos impactes ambientais totais aos diferentes produtos da cultura de arroz, recorrendo a propriedades físicas (massa, conteúdo energético ou em carbono) ou a outras características (valor económico). Contudo, a seleção do método de alocação mais adequado nem sempre é uma solução óbvia, pelo que, de acordo com as normas ISO referidas anteriormente, para verificar a influência que esta seleção tem nos resultados, é recomendado efetuar uma análise de sensibilidade considerando os diferentes métodos [71]. Neste estudo, foram então considerados 2 cenários, alocação mássica e alocação económica. A alocação mássica baseou-se em valores estimados da produção de arroz no Baixo Mondego em 2013, fornecidos pela Cooperativa Agrícola do Concelho de Montemor-o-Velho (Quadro 3.4), compatíveis com os dados apresentados no estudo BIODEN [10].

Quadro 3.4 – Estimativa da quantidade de produtos provenientes da cultura do arroz utilizados na alocação mássica

Produtos	Produção anual (valores estimados de 2013 em t)	Alocação mássica (%)	Alocação mássica (kg)
----------	---	-------------------------	--------------------------



Produtos	Produção anual (valores estimados de 2013 em t)	Alocação mássica (%)	Alocação mássica (kg)
Arroz	30.000	58,82%	1
Palha	15.000	29,41%	0,5
Casca	6.000	11,76%	0,2

Para a alocação económica, considerou-se o valor de mercado de cada um dos produtos (arroz, palha e casca), apresentados no Quadro 3.4. O valor económico do arroz foi fornecido pela Cooperativa Agrícola do Concelho de Montemor-o-Velho, enquanto o valor económico da palha foi fornecido por um produtor de arroz do Baixo Mondego. Para a casca, recorreu-se a dados de um artigo [72].

Quadro 3.5 – Preço médio de mercado de produtos provenientes da cultura do arroz utilizados na alocação económica

Produtos	Preço de mercado (€/kg)	Preço da quantidade produzida no Vale Mondego (€)	Alocação económica (%)
Arroz	0,27	8.100.000	85,44%
Palha	0,08	1.200.000	12,66%
Casca	0,03	180.000	1,90%

- **Inventário do ciclo de vida**

Esta fase, na qual são recolhidos dados sobre a produção de matérias-primas e consumos energéticos, assume-se como um ponto fundamental da ACV, sendo simultaneamente a fase mais complexa e morosa. Dadas as dificuldades na recolha de dados concretos da produção dos painéis, produzidos no estudo experimental desenvolvido nas instalações laboratoriais do ITeCons, apenas foram consideradas as principais entradas, nomeadamente, madeira OSB, parafusos de aço, palha de arroz, casca de arroz e lã de rocha. As estimativas de quantidade utilizadas no inventário basearam-se na caixa utilizada nos ensaios de acústica, sendo esta mais próxima da solução de parede final. No Quadro 3.6 é apresentado o inventário do ciclo de vida de 1 m<sup>2</sup> de painel de parede com distintos preenchimentos.

Quadro 3.6 – Inventário do ciclo de vida de 1 m<sup>2</sup> de painel de parede com distintos preenchimentos

Entradas	Eco-painel com preenchimento de palha de arroz (1m <sup>2</sup> )	Eco-painel com preenchimento de casca de arroz (1m <sup>2</sup> )	Painel com preenchimento de Lã de rocha (1m <sup>2</sup> )
----------	---	---	--

Entradas	Eco-painel com preenchimento de palha de arroz (1m <sup>2</sup> )	Eco-painel com preenchimento de casca de arroz (1m <sup>2</sup> )	Painel com preenchimento de Lã de rocha (1m <sup>2</sup> )
Placas de madeira OSB (m <sup>3</sup> )	0,016	0,016	0,016
Palha de arroz triturada (kg)	13,25	-	-
Casca de arroz (kg)	-	19,49	-
Lã de rocha (kg)	-	-	12,18
Eletricidade – trituração (kW.h)	1,5	-	-
Parafusos (kg)	0,76	0,76	0,76
Transporte (t.km)	0,72	1,12	2,16

- **Avaliação de impactes do ciclo de vida**

A fase de avaliação de impactes do CV dos painéis foi realizada com base em dois métodos: CED (*Cumulative Energy Demand*), para a avaliação energética, e CML – IA v4.1, para a avaliação ambiental. Em termos energéticos foram avaliados os consumos de energia primária renovável e não renovável. Relativamente às categorias de impacto ambiental foram selecionadas para este estudo as referidas na norma EN 15804, encontrando-se no Quadro 3.7 uma pequena descrição de cada uma.

Quadro 3.7 – Descrição das categorias de impacto

Método de AICV: CML - IA		
Categoria de impacto	Unidade	Descrição da categoria
Depleção de recursos abióticos (ADP)	kg Sb eq (elementos)	Avalia o uso de recursos não renováveis (por exemplo minerais) considerando as reservas e a taxa de desacumulação
	MJ (fóssil)	
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	Analisa a capacidade de determinadas substâncias formarem iões H <sup>+</sup> quando libertadas para o meio ambiente
Eutrofização (EP)	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	Mede o nível de macronutrientes formados no meio ambiente pelas emissões para o ar, água e solo de nutrientes
Aquecimento Global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	Determina o contributo de um gás com efeito de estufa para o aquecimento global
Depleção da camada do ozono (ODP)	kg CFC-11 eq	Mede o potencial de destruição da camada de ozono estratosférico provocado pela libertação de agentes químicos para o ambiente

<b>Método de AICV: CML - IA</b>	Método de AICV: CML - IA	Método de AICV: CML - IA
<b>Oxidação fotoquímica (PCOP)</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Quantifica a formação de substâncias reativas prejudiciais para a saúde humana e para ecossistemas

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Resultados dos Ensaios Térmicos

Tal como foi exposto anteriormente, os ensaios térmicos foram feitos aplicando uma temperatura média de 23° C e garantindo uma diferença de temperaturas entre pratos de 20° C. Como as soluções estudadas são constituídas por diferentes materiais, nomeadamente madeira OSB combinada com palha de arroz, casca de arroz ou lã de rocha, importa saber qual a contribuição de cada um deles para o coeficiente de condutibilidade térmica. A resistência térmica de todas as camadas resulta da soma das resistências de cada camada (2 - 4).

$$R_{total} = R_{madeira\ OSB} + R_{material} \quad (2)$$

podendo escrever-se

$$\frac{d_{total}}{\lambda_{total}} = \frac{d_{madeira\ OSB} \times 2}{\lambda_{madeira\ OSB}} + \frac{d_{material}}{\lambda_{material}} \quad (3)$$

de onde resulta

$$\lambda_{material} = \frac{d_{material}}{\left[ \frac{d_{total}}{\lambda_{total}} + \frac{d_{madeira\ OSB} \times 2}{\lambda_{madeira\ OSB}} \right]} \quad (4)$$

Para este efeito, ensaiaram-se as diferentes soluções compostas e as placas de madeira OSB individualmente, determinando-se posteriormente a resistência e condutibilidade de cada material (resultados apresentados nos Quadros 4.1 a 4.6).

No que diz respeito às placas de OSB, obtiveram-se resultados reprodutíveis de condutibilidade térmica (Quadro 4.1), obtendo-se um valor médio de 0,116 W/(m.°C).

Quadro 4.1 – Resultados dos ensaios térmicos das placas de madeira OSB

Referência do provete	OMH301A/13	OMH302A/13	OMH303A/13	Média
Espessura (mm)	15,5	15,6	15,6	15,6
Condutibilidade Térmica (W/(m.°C))	0,116	0,118	0,114	0,116
Resist. Térmica madeira (m².°C/W)	0,13	0,13	0,14	0,13

Na solução composta por OSB + palha de arroz, verifica-se que há uma diminuição sistemática da condutibilidade térmica da solução em função do aumento da massa volúmica da palha de arroz (Quadro 4.2). Os menores valores de condutibilidade ( $0,077 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ) foram obtidos para uma massa volúmica de  $43,4 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Uma vez que a variação de massa volúmica foi introduzida através da variação de espessura da caixa de madeira, é plausível que parte deste efeito provenha da referida variação de espessura da solução. De facto, a resistência térmica da solução, dada pelo quociente da espessura total pela condutibilidade térmica total, dá conta deste efeito. Assim, observa-se um aumento da resistência térmica da solução como consequência do primeiro aumento da massa volúmica da palha de  $29,1$  para  $33,5 \text{ kg}/\text{m}^3$ . No entanto, subsequentes aumentos de massa volúmica de palha conduziram a valores mais baixos de resistência térmica da solução.

Quadro 4.2 – Resultados dos ensaios térmicos da caixa de madeira OSB + palha de arroz ( $m_{\text{palha}}=1398\text{g}$ )

Referência do provete	OMH304A/13	OMH304A/13	OMH304A/13	OMH304A/13
Massa de palha (g)	1398	1398	1398	1398
Massa volúmica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	29,1	33,5	39,3	43,4
Espessura total (mm)	186,5	166,8	146	135
Espessura palha (mm)	155,0	135,0	115,0	104,0
Condut. Térmica total ( $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ )	0,103	0,089	0,085	0,077
Condut. Térmica palha ( $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ )	0,100	0,084	0,079	0,070
Resist. Térmica total ( $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ )	1,81	1,87	1,73	1,75
Resist. Térmica palha ( $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ )	1,55	1,61	1,47	1,49

Um segundo enchimento da caixa de madeira OSB com maior massa de palha permitiu estudar o comportamento da solução para valores superiores de massa volúmica, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 4.3. Verificou-se que o aumento de massa volúmica continua a promover a diminuição da condutibilidade térmica da solução, resultando no menor valor de condutibilidade de  $0,077 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  para uma massa volúmica de  $58,4 \text{ kg}/\text{m}^3$  e uma espessura de palha de  $115 \text{ mm}$ . Neste caso, não foi possível efetuar o ensaiopara menores espessuras de caixa, i.e., para maiores massas volúmicas.

Ainda sobre os resultados deste segundo enchimento, apesar da menor massa volúmica testada corresponder aproximadamente à maior massa volúmica do primeiro enchimento, obtiveram-se valores de condutibilidade e resistência térmica consideravelmente diferentes. Esta observação vem confirmar o efeito da espessura do enchimento de palha no comportamento térmico da solução. Assim, verifica-se que a maior espessura de caixa está associada a uma igualmente maior resistência térmica da solução.

Quadro 4.3 – Resultados dos ensaios térmicos da caixa de madeira OSB + palha de arroz ( $m_{\text{palha}}=2080\text{g}$ )

Referência do provete	OMH304A/13	OMH304A/13	OMH304A/13
Massa de palha (g)	2080,0	2080,0	2080,0
Massa volúmica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	43,3	49,8	58,4
Espessura total (mm)	186,5	166,8	146,0
Espessura palha (mm)	155,0	135,0	115,0
Condut. Térmica total ( $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ )	0,090	0,080	0,070
Condut. Térmica palha ( $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ )	0,090	0,074	0,065
Resist. Térmica total ( $\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )	2,08	2,10	2,03
Resist. Térmica palha ( $\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )	1,82	1,84	1,77

Com o intuito de estender o estudo da condutibilidade térmica da solução OSB + palha de arroz para valores de massas volúmica superiores, procedeu-se à trituração da palha. O aumento significativo da massa volúmica traduziu-se numa diminuição da condutibilidade térmica da solução, tendo sido obtido o valor mínimo de  $0,063 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  para uma massa volúmica de  $115,2 \text{ kg}/\text{m}^3$  e uma espessura de palha de  $115,2 \text{ mm}$  (ver Quadro 4.4).

Quadro 4.4 – Resultados dos ensaios térmicos da caixa de madeira OSB + palha de arroz triturada ( $m_{\text{palha}}=4100\text{g}$ )

Referência do provete	OMH001A/14	OMH001A/14
Massa de palha (g)	4100	4100
Massa volúmica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	98,1	115,2
Espessura total (mm)	165,4	145,7
Espessura palha (mm)	135	115
Condut. Térmica total ( $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ )	0,066	0,063
Condut. Térmica palha ( $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ )	0,06	0,06
Resist. Térmica total ( $\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )	2,53	2,31
Resist. Térmica palha ( $\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )	2,27	2,05

Com o objetivo de testar a influência da humidade presente na palha de arroz sobre a condutibilidade térmica, fizeram-se ensaios utilizando palha seca (não triturada) e obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 4.5. Sobre este conjunto de ensaios, verificou-se o mesmo comportamento, i.e., diminuição da condutibilidade térmica da solução. No entanto, os valores de condutibilidade térmica obtidos com a palha seca são consideravelmente inferiores aos que se obtiveram com a palha não seca, sugerindo que o teor de humidade influi no nível de isolamento térmico conferido pela solução.

Quadro 4.5 – Resultados dos ensaios térmicos da caixa de madeira OSB + palha de arroz seca ( $m_{\text{palha}}=1897\text{g}$ )

Referência do provete	OMH000A/14	OMH000A/14	OMH000A/14
Massa de palha (g)	1897,0	1897,0	1897,0
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	39,5	45,4	53,3
Espessura total (mm)	185,8	166,4	147,0
Espessura palha (mm)	155	135	115
Condut. Térmica total (W/(m.°C))	0,076	0,069	0,067
Condut. Térmica palha (W/(m.°C))	0,071	0,063	0,059
Resist. Térmica total (m <sup>2</sup> .°C/W)	2,45	2,42	2,21
Resist. Térmica palha (W/(m.°C))	2,19	2,16	1,95

Uma representação real da condutibilidade térmica da palha de arroz em função da massa volúmica pode ser obtida quando comparados os resultados para uma mesma espessura (Figura 4.1). Assim, para 135 mm de espessura de palha, observou-se que a condutibilidade térmica diminui com a massa volúmica. Observa-se, ainda, o efeito marcante que a redução do teor de humidade da palha tem no valor da condutibilidade térmica.

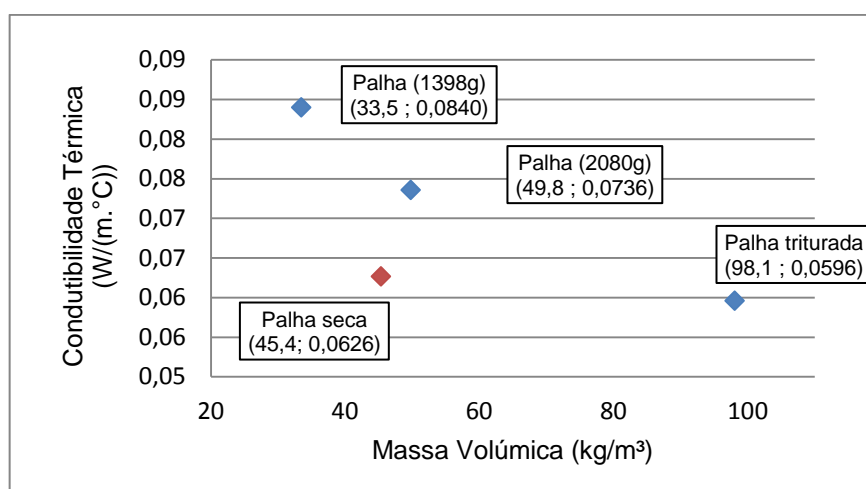


Figura 4.1 – Valor de condutibilidade térmica em função da massa volúmica para a mesma espessura de 135 mm.

Com a casca de arroz, material de composição química muito semelhante à palha mas significativamente mais fino, foi possível testar massas volúmicas ainda superiores, até um valor máximo de 137,9 kg/m<sup>3</sup>. Mais uma vez, observou-se que o aumento da massa volúmica foi responsável pela diminuição da condutibilidade térmica (Quadro 4.6).

Quadro 4.6 – Resultados dos ensaios térmicos da caixa de madeira OSB + preenchimento casca de arroz ( $m_{\text{casca}}=6031\text{g}$ )

Referência do provete	OMH332A/13	OMH332A/13
Massa de casca (g)	6031,0	6031,0
Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ )	125,7	137,9
Espessura total (mm)	185,8	172,3
Espessura palha (mm)	155	141,3
Condut. Térmica total ( $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ )	0,078	0,070
Condut. Térmica casca ( $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ )	0,073	0,064
Resist. Térmica total ( $\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )	2,39	2,46
Resist. Térmica casca ( $\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )	2,13	2,20

Quando comparados os materiais isolantes, palha e casca de arroz, observa-se que apesar de o nível de isolamento promovido pela casca de arroz estar entre as melhores soluções, são necessárias massas volúmicas muito superiores. A este respeito, importa ainda referir que aumentando a massa volúmica da palha de arroz para valores próximos do da casca, através de um processo de trituração, observou-se um nível de isolamento superior nas soluções contendo palha, podendo esta ser justificada pela menor espessura de caixa.

O desempenho térmico das soluções anteriores foi comparada com soluções de referência compostas por três tipos de lã de rocha, tendo os respetivos ensaios sido realizados apenas para uma massa volúmica de  $120\text{ kg/m}^3$ . Quando se analisam os resultados obtidos (Quadro 4.7), verifica-se que as condutibilidades térmicas médias são de  $0,052\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,  $0,051\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  e  $0,049\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  respetivamente para as soluções contendo as lãs de rocha RockTerm, RockWool e Lapinus. Apesar da condutibilidade térmica da solução contendo palha triturada ( $0,063\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ) apresentar valores comparáveis com os das lãs de rocha, verifica-se que o isolamento térmico alcançado pelas últimas ultrapassa aquele que é obtido recorrendo à palha e casca de arroz. No que diz respeito à palha de arroz, importa no entanto referir que as massas volúmicas utilizadas são inferiores às de lã de rocha.

Quadro 4.7 – Resultados dos ensaios térmicos da caixa de madeira OSB + preenchimento lã de rocha ( $m_{\text{lã}}=4900\text{g}$ ) para diferentes produtos de lã de rocha: (i) RockTerm - TERMOLAN, (ii) RockWool – XFLOC, e (iii) rocha Lapinus

Referência do provete	OMH371A/13	OMH374A/13	OMH378A/13
	TERMOLAN	XFLOC	Lapinus
Massa do provete após receção (g)	4900	4900	4900
Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ )	120,0	120,0	120,0



Referência do provete	OMH371A/13	OMH374A/13	OMH378A/13
	TERMOLAN	XFLOC	Lapinus
<b>Espessura total (mm)</b>	131,9	130,9	131,0
<b>Espessura lã de rocha (mm)</b>	101,5	100,5	100,6
<b>Condut. Térmica total (W/(m.°C))</b>	0,052	0,051	0,049
<b>Condut. Térmica lã de rocha (W/(m.°C))</b>	0,045	0,043	0,041
<b>Resist. Térmica total (m<sup>2</sup>.°C/W)</b>	2,56	2,58	2,70
<b>Resist. Térmica lã de rocha (m<sup>2</sup>.°C/W)</b>	2,24	2,32	2,45

Perante os resultados anteriores, pode concluir-se que estamos na presença de materiais isolantes. É expectável que o aumento da massa volúmica da palha, permita obter valores muito próximos dos revelados pela lã de rocha. Para esse efeito deverá proceder-se à moagem da palha com recurso a um crivo mais fino.

## 4.2 Resultados dos Ensaios Acústicos

Os resultados acústicos foram obtidos em conformidade com as normas de ensaio, anteriormente referidas. Para cada banda de frequência (1/3 de oitava), determinou-se o nível médio de pressão sonora em cada câmara (emissora e recetora), resultante das várias medições efetuadas. Procedeu-se, em caso de necessidade, a correções devido ao ruído de fundo, e determinou-se a área de absorção equivalente através do tempo de reverberação. O índice de redução sonora é calculado pela expressão (5).

$$R = L_1 - L_2 + 10 \times \log\left(\frac{S}{A}\right) \text{ (dB)} \quad (5)$$

em que:

$L_1$  – Nível sonoro medio na câmara emissora, para cada banda de frequência, em dB;

$L_2$  – Nível sonoro medio na câmara recetora, para cada banda de frequência, em dB;

$S$  – Área do elemento de ensaio expressa em m<sup>2</sup>, (igual a área do provete);

$A$  – Área de absorção equivalente da câmara recetora, expressa em m<sup>2</sup>.

O índice de isolamento sonoro é dado pelo ajuste da curva de referência à curva de isolamento sonoro. O ajuste é feito movimentando a curva de referência em intervalos de 1 dB até que a soma dos desvios desfavoráveis seja a maior possível, mas não superior a 32 dB. Uma vez feito o ajuste, o índice de isolamento,  $R_w$ , é dado pelo valor da curva de referência na frequência correspondente aos 500 Hz.

Os resultados obtidos para o índice de redução sonora e respetivos índices de isolamento a 500 Hz para as várias soluções testadas foram sistematizados (Anexo B). A análise destes é apresentada de seguida.

Como se observa na Figura 4.2, o comportamento acústico da caixa de OSB vazia, i.e., sem qualquer material de isolamento acondicionado, traduz-se num nível de isolamento sonoro crescente entre as baixas e as altas frequências, com um máximo situado entre as bandas de 400 e 1250 Hz e uma quebra entre as bandas de 1250 e 3150 Hz. No que diz respeito às baixas frequências, registam-se oscilações do isolamento resultantes dos fenómenos de ressonância produzidos no interior do espaço de ar da própria câmara. A quebra de isolamento sonoro entre as bandas de 1250 e 3150 Hz é, possivelmente resultado das múltiplas reflexões do som na caixa de ar, o que conduz a um fenómeno de ressonância. A primeira frequência ocorre para  $f = c/(2 \times h)$ , em que  $c$  é a velocidade do som (340 m/s) e  $h$  a espessura da caixa de ar. Resulta assim, que a primeira frequência de ressonância se regista para  $f = 340/2 \times 0,10 = 1700$  Hz.

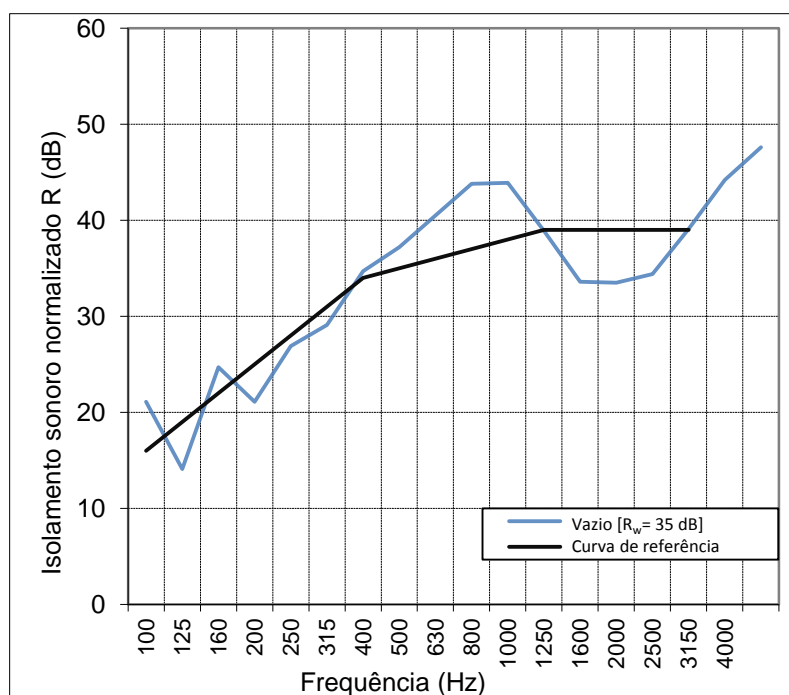


Figura 4.2 – Curva de isolamento sonoro normalizado da caixa de madeira OSB sem enchimento.

A introdução de palha conduziu a um aumento do nível de isolamento sonoro de 35 para 38 dB em todas as massas volúmicas testadas (Figura 4.3). No que diz respeito à massa volúmica, o seu aumento conduziu a um efeito complexo do nível de isolamento sonoro nas diferentes regiões de frequência. Para as baixas frequências, o nível de isolamento sonoro foi genericamente melhor para a massa volúmica de 30 kg/m<sup>3</sup>. Para as médias frequências, houve

um aumento significativo do nível de isolamento sonoro com o aumento da massa volúmica, principalmente na transição de 30 para 45 kg/m<sup>3</sup>.

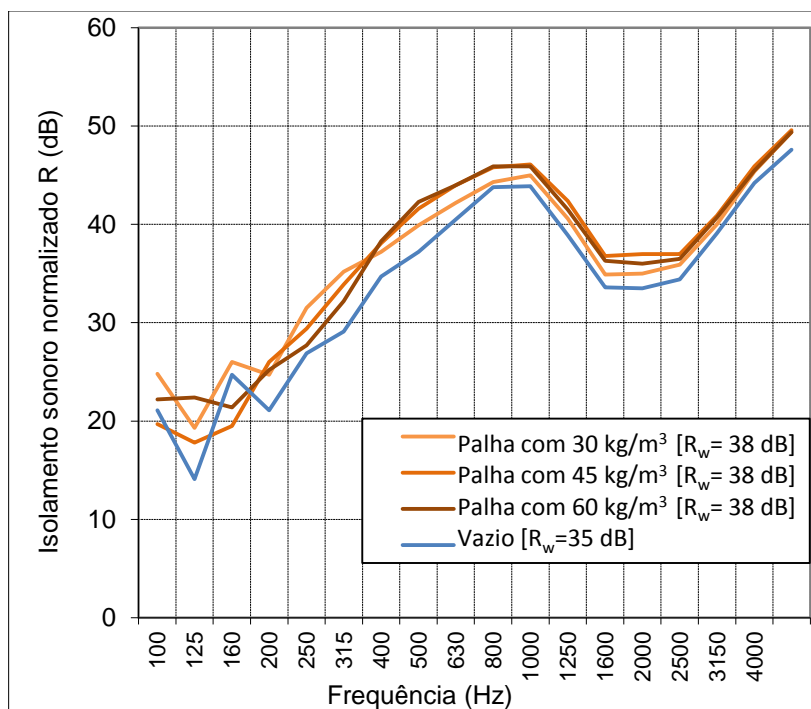


Figura 4.3 – Curva de isolamento sonoro normalizado da caixa de madeira OSB vazia e preenchida com palha de arroz para diferentes massas volúmicas.

A introdução de casca de arroz conduziu a um ligeiro aumento do nível de isolamento sonoro que, para ambas as massas volúmicas se situou nos 36 dB. Verifica-se que a quebra resultante nas frequências associadas à ressonância da caixa de ar diminui com o aumento da massa volúmica da casca de arroz. Em nenhum caso se observou a existência de quebras atribuídas a frequências críticas dos painéis, pois estas situam-se para frequências mais altas.

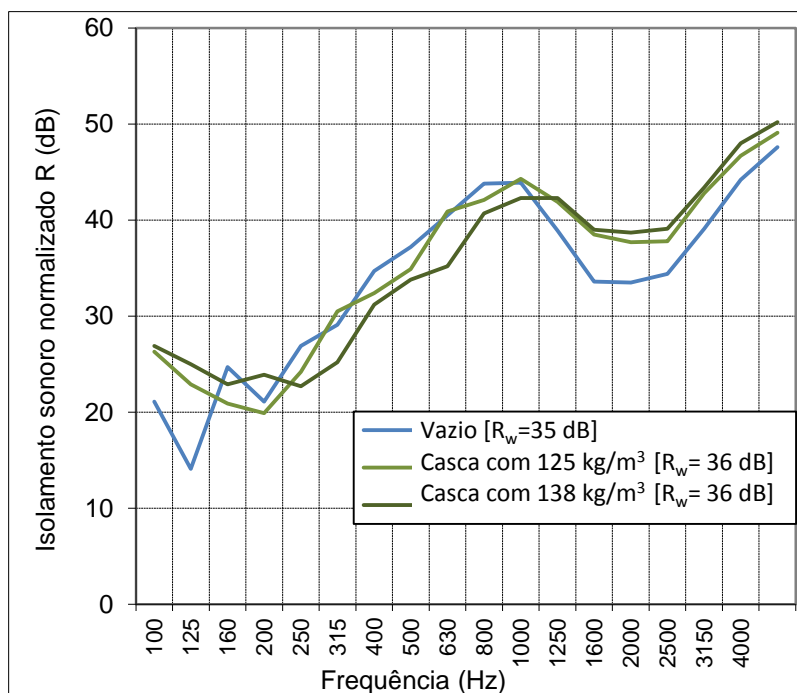


Figura 4.4 – Curva de isolamento sonoro normalizado da caixa de madeira OSB vazia e preenchida com casca de arroz para diferentes massas volúmicas.

A introdução da lã de rocha conduziu a um índice de isolamento sonoro de 36 dB num dos casos (Lapinus) e 37 dB nos restantes dois (Rockwool e RocTerm). O comportamento evidenciado pelas curvas de isolamento é semelhante ao descrito anteriormente.

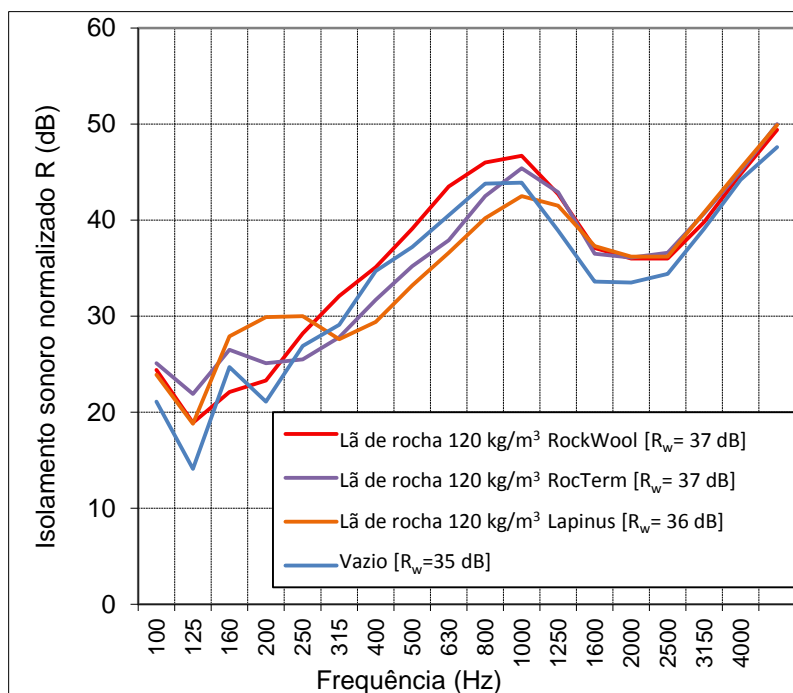


Figura 4.5 – Curva de isolamento sonoro normalizado da caixa de madeira OSB vazia e preenchida com diferentes lãs de rocha (120 kg/m<sup>3</sup>).

A análise dos resultados permite concluir que o isolamento sonoro conferido pela solução integrando palha de arroz é melhor do que aqueles obtidos com casca de arroz e lã de rocha.

### 4.3 Resultados da Avaliação do Ciclo de Vida

A avaliação ambiental comparativa da etapa de produção dos painéis de parede com distintos preenchimentos é apresentada na Figura 4.6. Pela análise da mesma, verificou-se que o painel com preenchimento de lã de rocha apresenta uma maior contribuição para todas as categorias de impacto, com exceção da depleção dos recursos abióticos (elementos). A maior contribuição deste painel deve-se ao consumo intensivo de combustíveis fósseis e recursos no processo produtivo da lã de rocha (ver Figura C.1 do Anexo C). Relativamente à depleção dos recursos abióticos (elementos), observou-se que os eco-painéis com preenchimento de palha e casca de arroz apresentam uma maior contribuição devido ao uso de solo no processo produtivo de arroz, sendo o painel com palha aquele que apresenta maior impacto (ver Figura C.1 do Anexo C). O eco-painel com preenchimento de casca de arroz apresenta o melhor desempenho para todas as categorias de impacto e para os diferentes cenários de alocação considerados. Quanto aos cenários de alocação, constatou-se que, ao utilizar a alocação mássica, os impactos, para todas as categorias, vão ser superiores aos impactos calculados através da alocação económica. Tal verificou-se, pois na alocação mássica a distribuição dos impactos foi efetuada de acordo com a massa dos coprodutos que apresentam um valor

superior, 29,41% no caso da palha e 11,76% no caso da casca, em relação aos valores calculados na alocação económica, 12,66% e 1,90%, respetivamente.

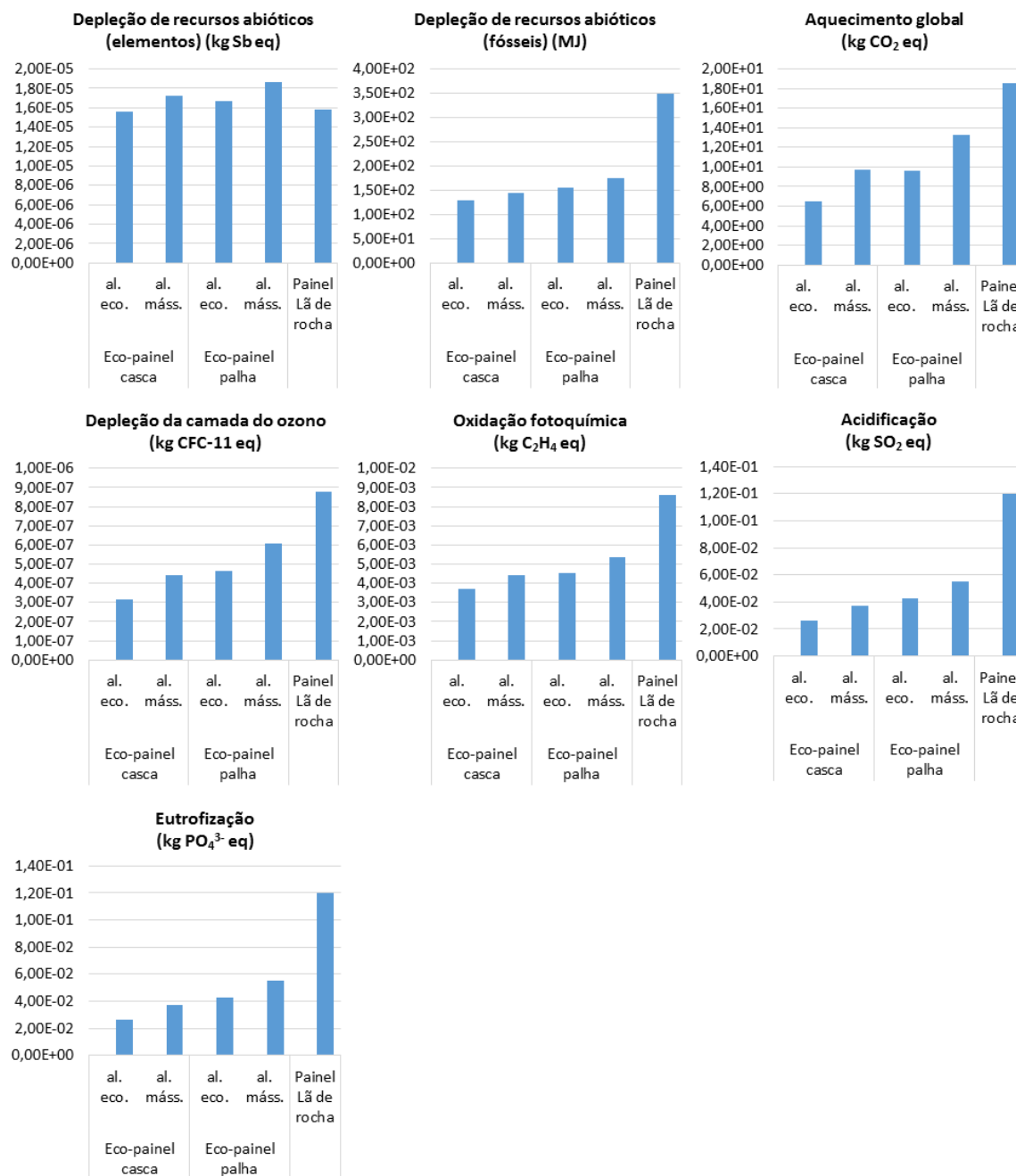


Figura 4.6 – Avaliação ambiental comparativa da etapa de produção dos painéis de parede com distintos preenchimentos.

A avaliação energética comparativa da etapa de produção dos painéis de parede com distintos preenchimentos é apresentada na Figura 4.7. Através da análise da mesma, observou-se que o painel com preenchimento de lã de rocha apresenta o maior consumo de energia total, incluindo as contribuições da energia primária renovável e não renovável. Verificou-se, ainda,

que este painel apresenta um consumo de energia não renovável muito superior ao de qualquer uma das restantes soluções, o qual se deve ao consumo intensivo de combustíveis fósseis no processo produtivo da lã de rocha (ver Figura C.2 do Anexo C). Para todos os eco-painéis compostos por palha e casca de arroz, constatou-se que o consumo de energia renovável é significativamente superior ao consumo de energia não renovável. Tal explica-se pelo facto destes provirem de materiais considerados renováveis, nomeadamente, madeira, casca e palha de arroz (ver Figura C.2 do Anexo C).

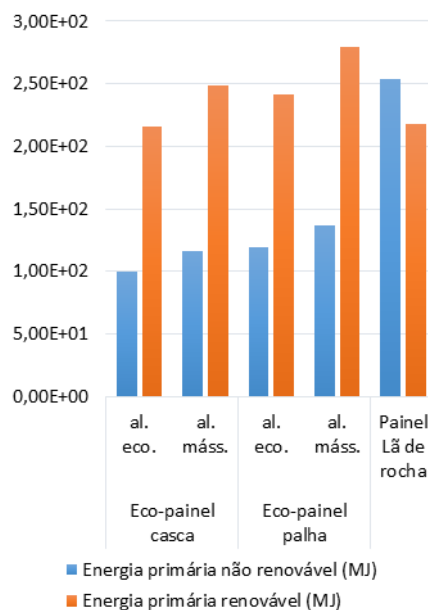


Figura 4.7 – Avaliação energética comparativa da etapa de produção dos painéis de parede com distintos preenchimentos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aproveitamento de subprodutos da indústria e outros tipos de resíduos no fabrico de materiais de construção tem sido apontado como uma estratégia do setor, sendo várias as vantagens que lhe estão associadas. Para além dos benefícios económicos e ecológicos, a incorporação destes materiais apresenta-se como uma excelente oportunidade para desenvolver produtos inovadores.

Os sistemas compostos por palha e casca de arroz foram comparados com os de uma solução construtiva equivalente constituída por lâ de rocha, sendo os resultados obtidos indicadores de níveis de isolamento térmico e acústico adequados aos objetivos de aplicação. Tendo sido obtidos valores de condutibilidade térmica para a solução composta por palha triturada, da mesma ordem de grandeza daqueles que foram obtidos para as soluções compostas por lâ de rocha. Importa também realçar o bom desempenho da solução composta por palha, no índice de isolamento sonoro a sons aéreos, tendo mesmo superado as soluções compostas por lâ de rocha.

De salientar, ainda, que a solução construtiva estudada integra na sua estrutura subprodutos do setor agrícola, mais concretamente da região do Baixo Mondego, acrescentando assim um novo significado à ecoeficiência da solução proposta. Neste caso, a Avaliação de Ciclo de Vida veio demonstrar que as soluções de eco-painel apresentam um melhor desempenho ambiental e energético quando comparadas com as soluções de lâ de rocha.

Uma solução construtiva como a que foi discutida nesta dissertação beneficiará ainda de estudos complementares que permitam caracterizar o comportamento da solução ao nível de durabilidade, reação ao fogo, compatibilidade com diferentes sistemas construtivos, entre outros. Da mesma forma, a previsão e otimização do comportamento desta solução pode beneficiar da realização de estudos de modelação numérica. No âmbito da Avaliação de Ciclo de Vida, poderia ter interesse proceder a um levantamento aprofundado de todos os consumos que a produção de arroz do Baixo Mondego acarreta, bem como proceder a uma contabilização pormenorizada de consumos da produção do eco-painel que não foram considerados na fase de inventário. Ainda neste âmbito, terá interesse avaliar o desempenho ambiental e energético, não apenas na etapa de produção, mas também na etapa de utilização.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] European Commission (EC), (2012). “Europe 2020 targets: Climate change and energy”. EC, Bruxelles;
- [2] Diretiva 2009/125/EC, do Parlamento e do Conselho de 21 de Outubro de 2009, relativa à criação de um quadro para definir os requisitos de conceção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia. *Jornal Oficial da União Europeia, No L285, 31 de Outubro de 2009*;
- [3] Regulamento (UE) n.º 305/2011, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 9 de Março de 2011 que estabelece condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção. *Jornal Oficial da União Europeia, No L88, 4 de Abril de 2011*;
- [4] Costa, M. (2011). “*Caracterização das propriedades físicas, mecânicas e térmicas de betões com incorporação de cortiça*”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra;
- [5] Almeida, A., Marques, P., (2013). “*A importância da cultura do arroz em Portugal e no Mundo*,” Boas Práticas no Cultivo de Arroz por Alagamento, em Portugal, Oeiras;
- [6] Decreto-Lei n.º 179/2012, de 3 de Agosto. *Diário da República, I Série, no 150, 2 de Agosto de 2012, Lisboa*;
- [7] Ribeiro, J. e Chorincas, J. (2011). “*Carta regional de competitividade Baixo Mondego*” Lisboa;
- [8] Ferreira, J. e Freitas, V. (2010). “*Aproveitamento hidroagrícola do Baixo Mondego, actualidade e desafios futuros*”;
- [9] IFAP (2013). Disponível em: [http://www.ifap.min-agricultura.pt/portal/page/portal/ifap\\_publico/GC\\_estatisticas](http://www.ifap.min-agricultura.pt/portal/page/portal/ifap_publico/GC_estatisticas). Acedida a 23 de dezembro de 2013;
- [10] Earth, B. (2008). “*BIODEN-Densificação da Palha de Arroz*” Lisboa;
- [11] POFC (2012). Disponível em: <http://www.pofc.qren.pt/areas-do-competite/incentivos-as-empresas/iedt/projectos-que-apoiamos/entity/valorizacao-da-casca-de-arroz-portugues?fromlist=1>. Acedida a 26 de dezembro de 2013;
- [12] Kerakoll (2013). Disponível em: [http://www.kerakoll.com/pt/produtos/greenbuilding\\_rating](http://www.kerakoll.com/pt/produtos/greenbuilding_rating). Acedida a 17 de dezembro de 2013;

- [13] Celauro, B., Celauro, C., Lo Presti, D. e Bevilacqua, A. (2012). “*Definition of a laboratory optimization protocol for road bitumen improved with recycled tire rubber*”. Construction and Building Materials, vol. 37;
- [14] Maier, P. e Durham, S. (2012). “*Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures*”. Construction and Building Materials, vol. 29;
- [15] Castro, S. e Brito, J. (2013). “*Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates*”. Journal of Cleaner Production, vol. 41;
- [16] Ferreira, L., Brito, J. e Saikia, N. (2012). “*Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate*”. Construction and Building Materials, Vol. 36;
- [17] Lavat, A., Trezza, M. e Poggi, M. (2009). “*Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture*”. Waste Management, vol. 29;
- [18] Silva, J., Brito, J. e Veiga, R. (2009). “*Incorporation of fine ceramics in mortars*”. Construction and Building Materials, vol. 23;
- [19] Silva, J., Brito, J., e Veiga, R. (2008). “*Fine ceramics replacing cement in mortars. Partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars*”. Materials and Structures, vol. 41;
- [20] Ozkan, O. e Yuksel, I. (2008). “*Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products*”. Construction and Building Materials, vol. 22;
- [21] Gonçalves, J., Tavares, L., Toledo, R., e Fairbairn, E. (2009). “*Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick*”. Construction and Building Materials, vol. 23;
- [22] Adolfsson, D., Robinson, R., Engström, F. Bo Björkman (2011). “*Influence of mineralogy on the hydraulic properties of ladle slag*”. Cement and Concrete Research, vol.41;
- [23] Rodriguez, Á., Manso, J., Aragón, Á. e Gonzalez, J. (2009). “*Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag*”. Resources, Conservation and Recycling, vol.53;
- [24] Corinaldesi, V., Moriconi, G., e Naik, T (2010). “*Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete*”. Construction and Building Materials, vol. 24;
- [25] Itim, A., Ezziane, K. e Kadri, E. (2011). “*Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions*”. Construction and Building Materials, vol. 25;
- [26] Chusilp, N., Jaturapitakkul, C. e Kiattikomol, K. (2009). “*Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars*”. Construction and Building Materials, vol. 23;

- [27] Pereira-de-Oliveira, L., Castro-Gomes, J. e Santos, P.(2012). “*The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars componentes*”. Construction and Building Materials, vol. 31;
- [28] Saikia, N. e Brito, J. (2012).”*Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: a review*”. Construction and Building Materials, vol. 34;
- [29] Saikia, N. e Brito, J. (2010). “*Use of industrial waste and municipality solid waste as aggregate filler or fiber in cement mortar and concrete*”. ICIST, Lisboa;
- [30] García, R., Villa, R., Vegas,I., Frías, M., e Rojas, M. (2008). “*The pozzolanic properties of paper sludge waste*”. Construction and Building Materials, vol. 22;
- [31] Medina, C., Frias, M. e Rojas, M. (2012). “*Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate*”. Construction and Building Materials, vol. 31;
- [32] Hwee Tan, K. e Du, H. (2013). “*Use of waste glass as sand in mortar: Part I - Fresh, mechanical and durability properties*”. Cement & Concrete Composites, vol. 35;
- [33] Frías, M., Savastano, H., Villar, E., Rojas, M. e Santos, S. (2012). “*Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes*”. Cement & Concrete Composites, vol. 34;
- [34] Frade, D., Tadeu, A., Torres, I., Mendes, P., Simões, N., Matias, G. e Neves, A. (2012). “*Argamassas industriais com incorporação de granulado de cortiça*”. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra;
- [35] Carvalho, R., Dias, F. e Varum, H. (2013). “*Cyclic behaviour of a lightweight mortar with cork granulate composite*”. Composite Structures, vol. 95;
- [36] Merino, M., Astorqui, J. e Cortina, M. (2007). “*Viability analysis and constructive applications of lightened mortar (rubber cement mortar)*”. Construction and Building Materials, vol. 21;
- [37] González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Junco, C. e Calderón, V.(2012). “*Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes*”. Construction and Building Materials, vol. 28;
- [38] Wang, W. e Wu, C. (2013). “*Benefits of adding rice straw coke powder to cement mortar and the subsequent reduction of carbon emissions*”. Construction and Building Materials, vol. 47;
- [39] Matias, G., Torres, I., e Faria, P. (2010). “*Argamassas de substituição com resíduos de tijolo cerâmico*”. 3º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Lisboa;
- [40] Matias, G., Faria, P., Torres, I., Tomás, A., Ferreira, T. e Duarte, T. (2012). “*Argamassas de cal aérea com resíduos de cerâmica*”. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra;

- [41] Billong, N., Melo, U., Kamseu, E., Kinuthia, J. e Njopwouo, D. (2011). “*Improving hydraulic properties of lime–rice husk ash (RHA) binders with metakaolin (MK)*”. Construction and Building Materials, vol. 25;
- [42] Ventolà, L., Vendrell, M., Giraldez, P. e Merino, L. (2011). “*Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics*”. Construction and Building Materials, vol. 25;
- [43] Morsy, M., Alsayed, S. e Salloum, Y. (2012). “*Development of eco-friendly binder using metakaolin–fly ash–lime–anhydrous gypsum*”. Construction and Building Materials, vol. 35;
- [44] Colangelo, F., Cioffi, R., Lavorgna, M., Verdolotti, L. e Stefano, L. (2011). “*Treatment and recycling of asbestos-cement containing waste*”. Journal of Hazardous Materials, vol. 195;
- [45] Katsioti, M., Mauridou, O., Moropoulou, A., Aggelakopoulou, E., Tsakiridis, P., Leonardou, S. e Oustadakis, P. (2010). “*Utilization of jarosite/alunite residue for mortars restoration production*”. Materials and Structures, vol. 43;
- [46] Corinaldesi, V. e Moriconi, G. (2009). “*Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate*”. Construction and Building Materials, vol. 23;
- [47] Braga, M., Brito, J. e Veiga, R. (2012). “*Incorporation of fine concrete aggregates in mortars*”. Construction and Building Materials, vol. 36;
- [48] Lopes, G. (2011). “*Avaliação do Ciclo de Vida de dois materiais de isolamento utilizados na construção civil: o poliestireno expandido e o aglomerado de cortiça expandida*”. Tese de Mestrado, Universidade do Porto – FEUP;
- [49] Torgal, F. (2014). “*Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020*”. Construction and Building Materials, vol. 51;
- [50] Pereira, P., Evangelista, L. e Brito, J. (2012). “*The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates*”. Construction and Building Materials, vol. 28;
- [51] Zhou, X., Zheng, F., Li, H. e Lu, C. (2010). “*An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalks fibres*”. Energy and Buildings, vol. 42;
- [52] Lertsutthiwong, P., Khunthon, S., Siralertmukul, K., Noomum, K. e Chandrachang, S. (2008). “*New insulating particleboards prepared from mixture of solid wastes from tissue paper manufacturing and corn peel*”. Bioresource Technology, vol. 99;
- [53] Khedari, J., Nankongnab, N., Hirunlabh, J. e Teekasap, S. (2004). “*New low-cost insulating particleboards from mixture of durian peel and coconut coir*”. Building and Environment, vol. 39;

- [54] Madurwar, M., Ralegaonkar, R., e Mandavgane, S. (2013). “*Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review*”. Construction and Building Materials, vol. 38;
- [55] Faustino, J., Pereira, L., Soares, S., Cruz, D., Paiva, A., Varum, H., Ferreira, J. e Pinto, J. (2012). “*Impact sound insulation technique using corn cob particleboard*”. Construction and Building Materials, vol. 37;
- [56] California Air resources Board Research Division (1997). “*Alternative uses of rice-straw in California*”. Sacramento;
- [57] Jones, B. (2002). “*Building with Straw Bales: A practical guide for the UK and Ireland*”. London;
- [58] Atkinson, C. (2008). “*Energy Assessment of a Straw Bale Building*”. London;
- [59] Goverse, T., Hekkert, M., Groenewegen, P., Worrell, E. e Smits, R. (2001). “*Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints*”. Resources, Conservation and Recycling, vol. 34;
- [60] Santos, C. e Matias, L. (2006). “*Coeficientes de transmissão térmica da envolvente dos edifícios*”. ITE 50 – LNEC, Lisboa;
- [61] Murakami, K., Sato, M., Kato, T. e Sugawara, K. (2012). “*Influence of difference in chemical compositions of rice straw on hydrogen formation in nickel-catalyzed steam gasification*”. Fuel Process. Technol, vol. 95;
- [62] Mehta, P. (1992). “*Rice Husk Ash - A unique supplementary cementing material*”. Proceeding International Symposium on Advances in Concrete Technology, Athens;
- [63] knowledgebank (2013). Disponível em: <http://www.knowledgebank.irri.org/rkb/rice-milling/byproducts-and-their-utilization/rice-husk.html>. Acedida a 8 de janeiro de 2014;
- [64] Larocho (2013). Disponível em: <http://www.larocho.com/> . Acedida a 20 de outubro de 2013;
- [65] Lambda-messtechnik (2013). Disponível em: <http://www.lambda-messtechnik.de/>. Acedida a 10 de outubro de 2013;
- [66] Castro, I., Tadeu, A., António, J., Moreira, A., Mendes, P. e Godinho, L. (2008). “*Câmaras móveis ITeCons para a realização de ensaios acústicos*”. Coimbra;
- [67] Santos, M. (2010). “*Avaliação de ciclo de vida de louça cerâmica sanitária*”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra;
- [68] Malça, J. e Freire, F. (2006). “*Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bioETBE: assessing the implications of allocation*”. Energy, vol. 31;

- [69] EnerBuiLCA (2012). “*Manual explicativo da Avaliação de ciclo de vida aplicada ao setor da construção*”. Projeto EnerBuiLCA;
- [70] NP EN ISO 14040:2008 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e linhas de orientação. Instituto Português da Qualidade (IPQ);
- [71] Garcia, R. e Freire, F. (2011). “*Modelação energética e ambiental do ciclo de vida de painéis aglomerados de partículas*”. Construlink, vol. 28;
- [72] Duarte, L., Esteves, M., Carvalheiro, F., Vicente, P. e Gírio, F. (2005). “*Os subprodutos agro-industriais de natureza lenhocelulósica*”. Do dossier de tecnologia agro-alimentar.

## 7 ANEXOS

## Anexo A – Teor de Humidade da Palha

O teor de humidade da palha é dado pela expressão seguinte (A.1).

$$W = \frac{m_{\text{palha introduzida na estufa}} - m_{\text{palha seca}}}{m_{\text{palha seca}}} \times 100 \quad (\text{A.1})$$

de onde resulta,

$$W = \frac{2605.5 - 2411}{2411} \times 100$$

$$W = 8.52 \%$$



## Anexo B – Resultados Acústicos

Quadro B.1 – Resultados obtidos dos ensaios acústicos.

Freq. (Hz)	Vazio [R <sub>w</sub> = 35 dB]	Palha com 30kg/m <sup>3</sup> [R <sub>w</sub> = 38 dB]	Palha com 45kg/m <sup>3</sup> [R <sub>w</sub> = 38 dB]	Palha com 60kg/m <sup>3</sup> [R <sub>w</sub> = 38 dB]	Casca de arroz 125kg/m <sup>3</sup> [R <sub>w</sub> = 36 dB]	Casca de arroz 138kg/m <sup>3</sup> [R <sub>w</sub> = 36 dB]	Lã de Rocha 120kg/m <sup>3</sup> Rockwool [R <sub>w</sub> = 37 dB]	Lã de Rocha 120kg/m <sup>3</sup> RocTerm [R <sub>w</sub> = 37 dB]	Lã de Rocha 120kg/m <sup>3</sup> Lapinus [R <sub>w</sub> = 36 dB]
100	21,1	24,8	19,7	22,2	26,3	26,9	24,4	25,1	23,9
125	14,1	19,3	17,8	22,4	22,9	25,0	18,9	21,9	18,8
160	24,7	26,0	19,5	21,4	20,9	22,9	22,1	26,5	27,9
200	21,1	24,7	26,0	25,2	19,9	23,9	23,3	25,1	29,9
250	26,9	31,5	29,4	27,7	24,2	22,7	28,2	25,5	30,0
315	29,1	35,2	33,9	32,2	30,5	25,2	32,1	27,8	27,6
400	34,7	37,2	38,1	38,3	32,4	31,2	35,1	31,7	29,4
500	37,2	39,9	41,6	42,3	34,9	33,8	39,1	35,2	33,2
630	40,5	42,2	44,0	44,0	40,9	35,2	43,5	37,9	36,6
800	43,8	44,3	45,8	45,9	42,1	40,7	46,0	42,5	40,2
1000	43,9	45,0	46,1	45,9	44,3	42,3	46,7	45,4	42,5
1250	38,9	40,6	42,4	41,5	41,9	42,3	42,7	42,9	41,5
1600	33,6	34,9	36,8	36,3	38,5	39,0	37,1	36,5	37,3
2000	33,5	35,0	37,0	36,0	37,7	38,7	36,0	36,1	36,2
2500	34,4	35,9	37,0	36,5	37,8	39,1	36,0	36,6	36,2
3150	39,1	40,0	40,9	40,7	42,8	43,4	39,8	40,7	40,8
4000	44,2	45,4	45,9	45,5	46,7	48,0	44,8	45,1	45,4
5000	47,6	49,4	49,6	49,4	49,1	50,2	49,4	50,0	49,9

## Anexo C – Resultados ACV

Características (Quadro C.1) e quantidades de matérias-primas e energia utilizadas (Quadro C.2) na produção do eco-painel constituído por madeira OSB e palha de arroz triturada.

Quadro C.2 – Características do eco-painel com preenchimento de palha de arroz triturada

Identificação		Eco-painel palha triturada
Características	Tipo de produto	Palha de arroz triturada
	Dimensões C × A × L (cm)	100 × 100 × 14,57
	kg/unidade	22,5
	kg/m <sup>2</sup>	22,5
	kg/m <sup>3</sup>	154,4
	Condutividade térmica (w/m <sup>2</sup> . °C)	0,063

Quadro C.3 – Inventário detalhado do ciclo de vida de 1 m<sup>2</sup> de eco-painel com preenchimento de palha de arroz triturada

Entradas	Unidade	Quantidade	Origem (local)	Distância média (km)	Transporte (tkm)
Placas de OSB	kg/m <sup>2</sup>	9,25	Cadima (Cantanhede)	27,80	0,26
	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,016			
Palha de arroz	kg/m <sup>2</sup>	13,25	Baixo Mondego (Montemor-o-Velho)	35	0,46
Eletricidade (triturar)	kWh	1,50	-	-	-
Parafusos	un/m <sup>2</sup>	40	-	-	-
	kg/un	0,76	-	-	-

Características (Quadro C.3) e quantidades de matérias-primas e energia utilizadas (Quadro C.4) na produção do eco-painel constituído por madeira OSB e casca de arroz.

Quadro C.4 – Características do eco-painel com preenchimento de casca de arroz

Identificação		Eco-painel casca
Características	Tipo de produto	Casca de arroz
	Dimensões C × A × L (cm)	100 × 100 × 172,3
	kg/unidade	28,80
	kg/m <sup>2</sup>	28,80
	kg/m <sup>3</sup>	166,80
	Condutividade térmica (w/m <sup>2</sup> . °C)	0,070

Quadro C.5 – Inventário detalhado do ciclo de vida de 1 m<sup>2</sup> de eco-painel com preenchimento de casca de arroz

Entradas	Unidade	Quantidade	Origem (local)	Distância média (km)	Transporte (tkm)
Placas de OSB	kg/m <sup>2</sup>	9,25	Cadima (Cantanhede)	27,80	0,26
	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,016			
Casca de arroz	kg/m <sup>2</sup>	19,49	Baixo Mondego (Montemor-o-Velho)	44,10	0,86
Parafusos	un/m <sup>2</sup>	40	-	-	-
	kg/un	0,76	-	-	-

Características (Quadro C.5) e quantidades de matérias-primas e energia utilizadas (Quadro C.6) na produção do painel constituído por madeira OSB e lã de rocha.

Quadro C.6 – Características do painel com preenchimento de lã de rocha

Identificação		Painel de lã de rocha
Características	Tipo de produto	Lã de rocha
	Dimensões C × A × L (cm)	100 × 100 × 131,90
	kg/unidade	21,43
	kg/m <sup>2</sup>	21,43
	kg/m <sup>3</sup>	162,5
	Condutividade térmica (w/m <sup>2</sup> . °C)	0,052

Quadro C.7 – Inventário detalhado do ciclo de vida de 1 m<sup>2</sup> de painel com preenchimento de lã de rocha

Entradas	Unidade	Quantidade	Origem (local)	Distância média (km)	Transporte (tkm)
Placas de OSB	kg/m <sup>2</sup>	9,25	Cadima (Cantanhede)	27,80	0,26
	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,016			
Lã de rocha	kg/m <sup>2</sup>	12,18	TERMOLAN (Aves)	156	1,90
Parafusos	un/m <sup>2</sup>	40	-	-	-
	kg/un	0,76	-	-	-

No Quadro C.7 são apresentados os potenciais impactes ambientais e consumo energético de 1 m<sup>2</sup> de painel de parede com distintos preenchimentos.

Quadro C.8 – Potenciais impactes ambientais e consumo energético de 1 m<sup>2</sup> de painel de parede com distintos preenchimentos

Método de caracterização	Categoria de impacto	Unidade	Eco-painel com preenchimento de casca de arroz		Eco-painel com preenchimento de palha de arroz		Painel de lã de rocha
			Alocação económica	Alocação mássica	Alocação económica	Alocação mássica	
CML-IA	Depleção de recursos abióticos (elementos)	kg Sb eq	1,56E-05	1,72E-05	1,67E-05	1,86E-05	1,58E-05
	Depleção de recursos abióticos (fósseis)	MJ	1,28E+02	1,45E+02	1,55E+02	1,74E+02	3,48E+02
	Acidificação	kg SO <sub>2</sub> eq	2,61E-02	3,69E-02	4,26E-02	5,51E-02	1,20E-01
	Eutrofização	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	1,23E-02	1,83E-02	1,79E-02	2,49E-02	2,98E-02
	Aquecimento global	kg CO <sub>2</sub> eq	6,48E+00	9,67E+00	9,64E+00	1,33E+01	1,85E+01
	Depleção da camada do ozono	kg CFC-11 eq	3,14E-07	4,42E-07	4,62E-07	6,09E-07	8,80E-07
	Oxidação fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	3,71E-03	4,43E-03	4,55E-03	5,38E-03	8,59E-03
CED	Energia não renovável total	MJ	1,00E+02	1,16E+02	1,19E+02	1,37E+02	2,53E+02
	Energia renovável total	MJ	2,16E+02	2,49E+02	2,41E+02	2,79E+02	2,18E+02

Na Figura C.1 é apresentada a avaliação ambiental comparativa do processo de produção dos painéis de parede com distintos preenchimentos.

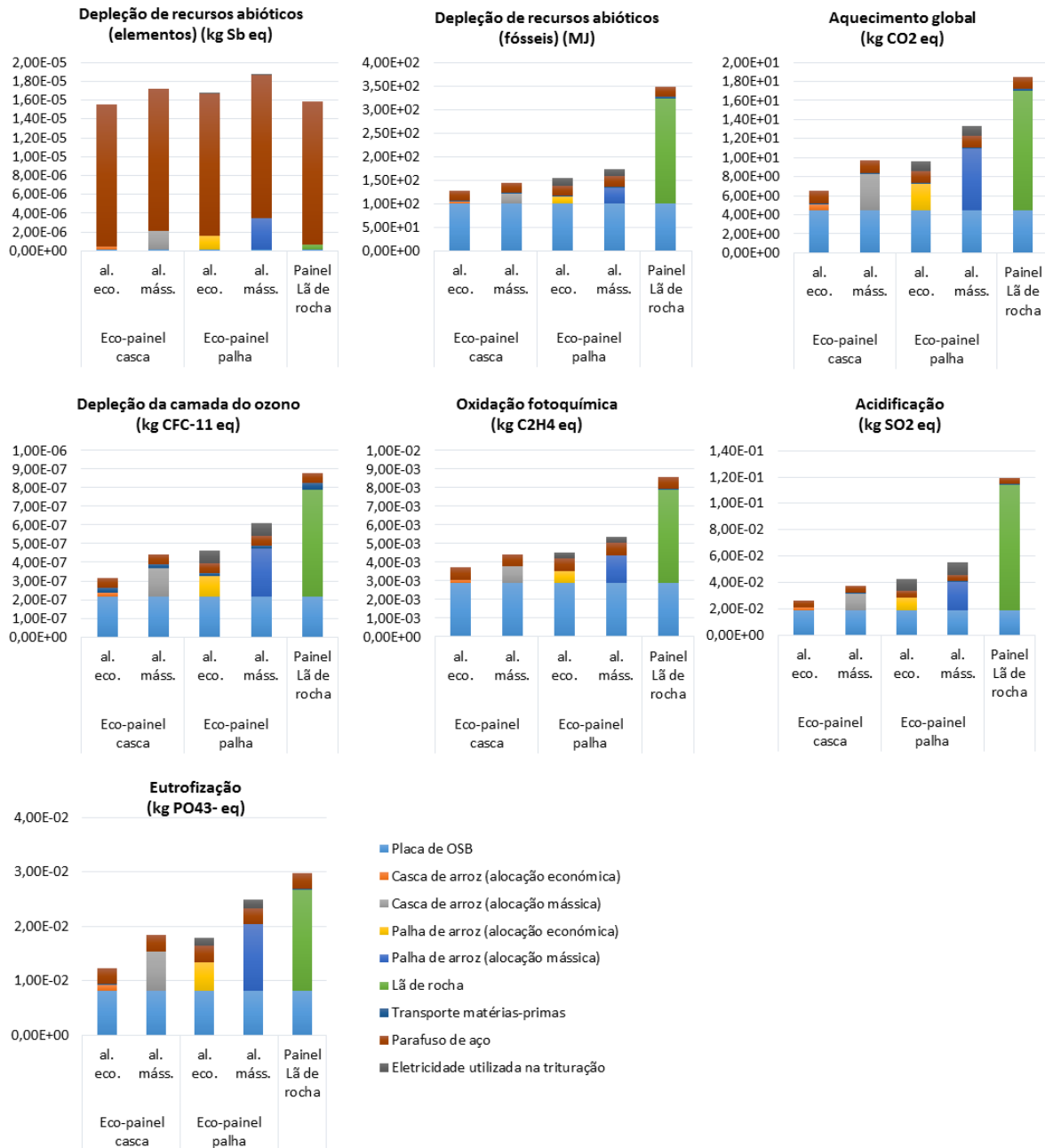


Figura C.1 – Avaliação ambiental comparativa do processo de produção dos painéis de parede com distintos preenchimentos.

Na Figura C.2 é apresentada a avaliação energética comparativa do processo de produção dos painéis de parede com distintos preenchimentos.

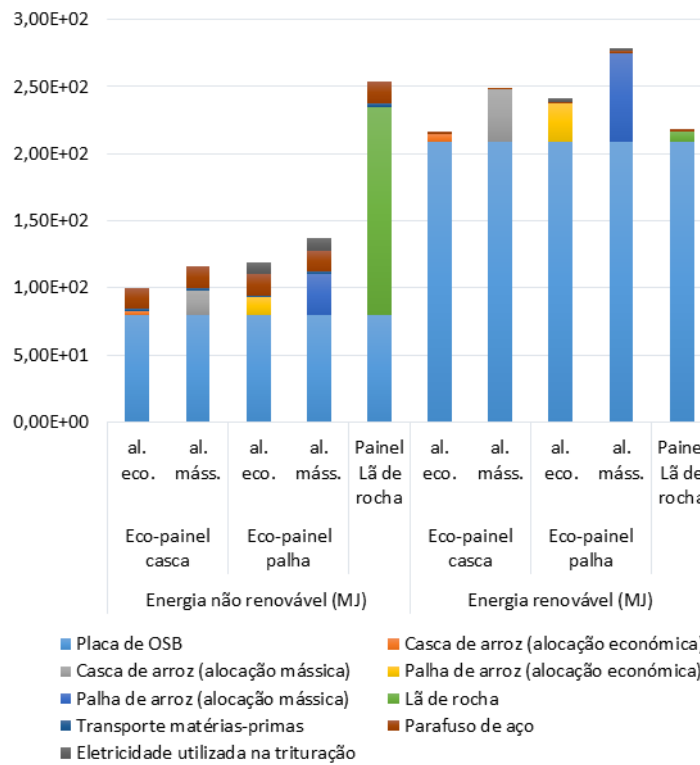


Figura C.2 – Avaliação energética comparativa do processo de produção dos painéis de parede com distintos preenchimentos.