



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Rafaela Coelho Gonçalves

AVALIAÇÃO PROSPETIVA DE CICLO DE VIDA DE
PAINÉIS DE CASCA DE ARROZ

Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Tecnologia e Indústria Sustentável, orientada pela Professora Carla Rodrigues e coorientada pelo Professor Fausto Freire e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2022

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

Rafaela Coelho Gonçalves

Avaliação prospetiva de ciclo de vida de painéis de casca de arroz

Prospective life cycle assessment of rice husk panels

Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização de Tecnologia e Indústria Sustentável
orientada pela Professora Carla Rodrigues e coorientada pelo Professor Fausto Freire

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

Setembro de 2022

1 2  9 0

UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Expresso o meu agradecimento a todos que tanto direta como indiretamente me ajudaram neste processo.

Primeiramente, um agradecimento especial à minha orientadora, Doutora Carla Rodrigues, pelo auxílio prestado no desenvolvimento desta dissertação, pela disponibilidade, empenho e acessibilidade. Foi fundamental à realização desta tese.

Agradeço também ao Professor Fausto Freire, coorientador, por todo o interesse demonstrado, partilha de conhecimento e aconselhamento. Agradeço também o acolhimento no Centro para a Ecologia Industrial e por me envolver no projeto SET-LCA.

Quero agradecer às minhas colegas de curso, em particular à Joana e Eliana e às minha colegas de casa, Carolina e Mariana, pela amizade e excelente companhia durante este percurso académico.

Ao meu namorado, Pedro, pelo carinho, apoio e por toda a ajuda que me deu no decorrer deste percurso.

Agradeço ao meu irmão pela amizade, companheirismo e pela motivação constante.

Por fim e mais importante, o maior agradecimento aos meus pais, pelo apoio incondicional, por todas as palavras de incentivo e pelo esforço que fizeram para chegar aqui.

Esta dissertação foi parcialmente apoiada através do projeto SET-LCA (CENTRO-01-0145-FEDER-030570) cofinanciado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER)

RESUMO

A utilização de painéis é amplamente utilizada no setor da construção. Adicionalmente, o desenvolvimento de novos produtos utilizando resíduos como material de base é uma área emergente no mercado e de relevância no contexto da promoção da economia circular, sendo assim importante analisar as questões ambientais inerentemente associadas a esses produtos. A avaliação de ciclo de vida (ACV) pode ser usada para avaliar o desempenho ambiental destes produtos. Por vezes, estes novos produtos encontram-se em situações de baixo nível de prontidão tecnológica, existindo a necessidade de escalonamento (*scale up*) de processos e criação de cenários alternativos. O objetivo desta tese é avaliar o desempenho ambiental de ciclo de vida do painel de casca de arroz num estágio inicial de desenvolvimento, através da metodologia de ACV. Os objetivos intercalares necessários são: 1- desenvolver um modelo e inventário de ciclo de vida para o painel de casca de arroz à escala laboratorial; 2- avaliar e comparar os impactes ambientais do ciclo de vida do painel de casca de arroz com um painel de fibra de casca de coco já estudado, à escala laboratorial; 3- Implementar um *scale up* para a escala industrial do modelo e inventário do painel de casca de arroz desenvolvido à escala laboratorial; 4- Avaliar e comparar os impactes ambientais do ciclo de vida do painel de casca de arroz com um painel alternativo de fibra de casca de coco e com um painel convencional de fibra de madeira, já estudado, à escala industrial.

Dois cenários foram tidos em consideração para responder à falta de informação sobre as necessidades energéticas de produção dos painéis. Uma fronteira do berço ao portão (*cradle to gate*) e uma unidade funcional de 1 m³ de painel foram adotadas.

Os resultados mostraram que o aglutinante é o principal ponto crítico tanto na análise da escala laboratorial como na análise da escala industrial.

A análise prospetiva do painel de casca de arroz demonstrou um bom desempenho ambiental numa futura produção à escala industrial, uma vez que, para sete das dez categorias selecionadas, os impactes ambientais são inferiores aos impactes dos painéis convencionais de madeira bem como de painéis alternativos de outros resíduos agroindustriais como a casca de coco, que também se encontram em fases iniciais de desenvolvimento.

Palavras-chave: Avaliação de ciclo de vida, casca de arroz, escalonamento, fibra de casca de coco, painel de madeira.

ABSTRACT

The use of panels is widely used in the construction sector. Additionally, the development of new products using waste as a base material is an emerging area in the market and relevant in the context of promoting the circular economy, for which is important to assess the environmental impacts. This theses employed Life cycle assessment (LCA) to evaluate the environmental performance of rice husk panel at an early stage of development (low technological readiness), using process scaling and scenario analysis, including the following specific objectives: 1- develop a life cycle model and inventory for the rice husk panel at laboratory scale; 2- evaluate and compare the life cycle environmental impacts of the rice husk panel with an already studied coconut fiber panel at laboratory scale; 3- scale-up the model and inventory of the rice husk panel developed at laboratory scale; 4- evaluate and compare the life cycle environmental impacts of the rice husk panel with an alternative coconut fibre panel and with a conventional wood fiber panel, already studied, at industrial scale.

Two scenarios were taken into consideration to address the lack of information on the energy requirements of panel production. A cradle to gate boundary and 1 m³ panel functional unit were adopted.

The results showed that the binder is the main critical point in both laboratory scale and industrial scale analysis.

The prospective analysis of the panel demonstrated good environmental performance in future industrial scale production, and for seven of the ten categories analysed, the environmental impacts are lower than the impacts of conventional wood panels as well as alternative panels from other agro-industrial wastes such as coconut husk that are also in early stages of development.

Keywords: Life cycle assessment, rice husk, scale up, coconut husk fiber, wood panels

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABELAS	vi
ABREVIATURAS	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento e motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura da Dissertação.....	3
2. ESTADO DA ARTE: REVISÃO E ANÁLISE DA LITERATURA	5
2.1 Aplicações da casca de arroz.....	5
2.2 Avaliação de ciclo de vida de painéis.....	6
3. MATERIAIS E MÉTODOS	11
3.1 Metodologia de avaliação de ciclo de vida.....	11
3.2 Definição de objetivo e âmbito.....	13
3.3 Modelo e Inventários de ciclo de vida.....	14
3.4 Categorias de impacte ambiental.....	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1 Avaliação de impactes de ciclo de vida – escala laboratorial.....	22
4.2 Avaliação de impactes de ciclo de vida – escala industrial.....	26
5. CONCLUSÕES	35
5.1 Avaliação de ciclo de vida.....	35
5.2 Limitações e investigações futuras.....	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
ANEXOS	A-1
A1. Tabela de propriedades de painéis que incorporam casca de arroz ..	A-2
A2. Fluxogramas	A-3

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Estratégia de avaliação de ciclo de vida. Adaptado de ISO 14040:2006.....	12
Figura 3.2 - Casca de arroz e painel de casca de arroz. Fonte: Marques et al. (2020)....	13
Figura 3.3 - Fluxograma de ciclo de vida do painel de casca de arroz e fronteiras do sistema (do berço ao portão) para a escala laboratorial (verde) e industrial (amarelo).....	14
Figura 3.4 - Processos considerados no ciclo de vida do painel de casca de arroz.....	17
Figura 4.1 - 1 Impactes ambientais de CV de 1 m ³ de painel de casca de arroz e fibra de casca de coco sem e com aglutinante UF produzido à escala laboratorial.....	26
Figura 4.2 – Impactes ambientais de CV de 1 m ³ de painel de casca de arroz, madeira e fibra de casca de coco, com e sem aglutinante, produzidos à escala industrial.....	33

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características dos estudos de ACV de painéis	6
Tabela 3.1 - Inventário para a produção à escala laboratorial do painel de casca de arroz (1 m ³) e de fibra de casca de coco com e sem aglutinante UF (1 m ³ e 0,0000605 m ³)...	15
Tabela 3.2 - Inventário para a produção industrial (scale up) de 1 m ³ de painel de casca de arroz, fibra de casca de coco e fibra de madeira	19
Tabela 3.3 - Inventário da produção de 1 m ³ painel de casca de arroz para a escala laboratorial e industrial	20
Tabela 3.4 - Categorias de impacte ambiental	21
Tabela 4.1 - Contribuições das emissões da produção de painéis de casca de arroz à escala laboratorial e industrial.....	34

ABREVIATURAS

Acidificação (AC)

Acidificação terrestre (AT)

Aquecimento Global (AG)

Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

Depleção Abiótica (DA)

Eutrofização (EF)

Consumo de Recursos Energéticos (CRE)

Consumo de Recursos Não Renováveis (CRNR)

Consumo de Recursos Renováveis (CRR)

Depleção da Camada de Ozono (DCO)

Depleção dos Recursos Hídricos (DRH)

Depleção dos Recursos Minerais (DRM)

Ecotoxicidade (ET)

Ecotoxicidade de Água Doce (ED)

Ecotoxicidade Marinha (EM)

Ecotoxicidade Terrestre (ET)

Food and Agriculture Organization (FAO)

Formação Fotoquímica da Troposférica (FFT)

Formação de Matéria Particulada (FMP)

Formação de Ozono Fotoquímico (FOF)

High Density Fibreboard (HDF)

Medium Density Fibreboard (MDF)

Medium Density Particleboard (MDP)

Oriented Strand Board (OSB)

Oxidação Fotoquímica (OF)

Radiação Ionizante (RI)

Toxicidade Humana (TH)

Uso do Solo (US)

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo introduz o tema que será abordado ao longo desta tese. Inicia-se com um breve enquadramento e motivação, em seguida apresentam-se os objetivos e, por fim, a estrutura da dissertação.

1.1 Enquadramento e motivação

Com os edifícios a tornarem-se cada vez mais energeticamente eficientes, os impactos incorporados dos materiais tornam-se mais relevantes. Adicionalmente, a utilização de materiais à base de resíduos é uma área emergente no desenvolvimento de novos produtos para o sector da construção, com relevância também no contexto da promoção da economia circular. Os painéis de madeira são amplamente utilizados como paredes interiores, revestimentos e mobiliário. Em alternativa, painéis feitos a partir de resíduos agroindustriais têm vindo a ser desenvolvidos à escala laboratorial para agregar valor aos resíduos e diminuir a procura por madeira e seus subprodutos (Buratti et al. 2018). Para avaliar o possível benefício ambiental de painéis que incorporam resíduos, em comparação com os convencionais painéis de madeira, é importante realizar estudos de avaliação de ciclo de vida desde a recolha dos resíduos até ao final de vida do painel para avaliar os impactos ambientais e identificar oportunidades de melhorias.

A avaliação do ciclo de vida é uma metodologia que é aplicada em inúmeros sistemas de produtos diferentes. A maioria dos estudos da ACV diz respeito a sistemas existentes no mercado, contudo, quando um produto se encontra num nível de desenvolvimento inicial, como o caso de painéis que incorporam resíduos, este tipo de estudo acarreta um desafio adicional. (Thonemann, Schulte, and Maga 2020). Quando a tecnologia estudada se encontra numa fase inicial de desenvolvimento, a aplicação da metodologia de avaliação de ciclo de vida torna possível a antecipação de questões e possíveis problemas de um produto antes de ser produzido. (Cucurachi et al., 2018).

Ao longo da fase de desenvolvimento são tomadas decisões relativas ao processamento, materiais e fontes de energia, e estas decisões numa fase inicial têm uma grande influência na futura funcionalidade, custos e impactos ambientais do produto (Villares et al. 2017). Avaliações ambientais realizadas proactivamente em vez de reactivamente têm uma grande importância, uma vez que, cerca de 80 % dos impactos ambientais de um produto ou processo se encontram na fase de conceção (Tischner et al. 2000). A condução desta avaliação enfrenta, por vezes, vários problemas no desenvolvimento de inventários, definição de unidade funcional e no tipo de pressupostos necessários à estimativa, devendo realizar-se com base em múltiplos cenários, de modo a abranger as diferentes

variações existentes aos processos. (Cucurachi et al. 2018). Este estudo de ACV é designado por ACV do tipo prospetivo (Arvidsson et al. (2014)

O arroz é um dos principais cereais de base alimentar em todo o globo. Estima-se que a cultura do arroz *Oryza sativa* (L.) tenha mais de 10000 anos e se tenha espalhado a partir do sudeste asiático. De acordo com a base de dados *Food and Agriculture Organization*, FAO, foram produzidos mais de 759 milhões de toneladas de arroz em todo o mundo no ano de 2017. Em Portugal, o cultivo reparte-se maioritariamente pelos Vales do Mondego, Tejo e Sorraia e do Sado, sendo que a produção anual, segundo o Instituto Nacional de Estatística (INE), corresponde a mais de 179 mil toneladas, tornando-se um dos principais países produtores de arroz da União Europeia.

No processo de produção do arroz são originados resíduos como palha e casca, sendo que a casca corresponde a 20 % (em peso) da produção de arroz. Por não ter interesse comercial e por não ser adequada para a alimentação animal (Abaide et al. 2019), a casca de arroz é frequentemente transportada para aterro (António et al. 2018) e eliminada através da utilização da mesma no solo. Este processo de eliminação tem um impacte ambiental adverso, uma vez que demora aproximadamente cinco anos a decompor-se, devido ao elevado teor em sílica, que a torna abrasiva e resistente à humidade, bem como devido ao elevado conteúdo de minerais e ao tipo de lenhina que faz reduzir a sua biodegradabilidade (da Rosa et al. 2015). Sendo a casca de arroz um produto endógeno com significância na produção agrícola do arroz em Portugal, foi identificado como uma potencial matéria-prima para produzir painéis equivalentes aos convencionais painéis de madeira (António et al. 2018).

Tendo em conta a grande quantidade de arroz colhida todos os anos em Portugal e em todo o mundo, a recuperação deste resíduo melhoraria a sustentabilidade desta atividade agrícola e ajudaria a reduzir o impacte ambiental dos meios de eliminação do mesmo, sendo este o interesse em encontrar um uso eficiente para a casca de arroz. A integração da casca em produtos como painéis para aplicações de revestimento, além do aproveitamento de recursos endógenos, tornar-se-ia numa oportunidade de valorização destes resíduos, contribuindo assim para uma economia circular.

Marques et al. (2020) apresentou um estudo do comportamento mecânico, térmico e acústico de um painel de casca de arroz produzido à escala laboratorial, que confirma o bom desempenho da incorporação destes resíduos para aplicação em soluções de construção. Para garantir que a produção deste tipo de painéis é ambientalmente vantajosa, ou seja, de reduzidos impactes ambientais, é necessária a realização de um estudo de avaliação de ciclo de vida. Como este produto se encontra num nível de desenvolvimento inicial de produção, além de existir falta de informação, a natureza dos dados é de escala laboratorial, num TRL entre 3 e 4 (NASA, 2015). Por isto, existe a necessidade de escalonar a informação para o nível industrial e, só aí, proceder a uma avaliação prospetiva de ciclo de vida, de modo a fornecer informações sobre os potenciais

impactes ambientais de ciclo de vida do painel de casca de arroz. Adicionalmente, tendo em conta esta falta de informação relativa ao processo de produção, é importante fazer a comparação com outros estudos de painéis à base de resíduos em fases de desenvolvimento semelhantes. Neste sentido, foi identificado um estudo de ACV de um painel com fibra de coco (Freire et al., 2017) que apresenta dados de produção à escala laboratorial e piloto, que foi utilizado como base e adaptado para o modelo de ciclo de vida do painel de arroz desenvolvido nesta tese.

Uma vez que a finalidade deste produto é substituir os painéis convencionais existentes numa perspetiva de melhoria de desempenho ambiental deste tipo de produtos, é essencial realizar uma comparação dos resultados da produção dos painéis de casca de arroz com os painéis convencionais de madeira para avaliar os potenciais benefícios ambientais e oportunidades de melhoria.

1.2 Objetivos

Esta tese tem como principal objetivo avaliar o desempenho ambiental de ciclo de vida de um painel de casca de arroz, através da metodologia de ACV prospetiva e, posteriormente, compará-lo com painéis convencionais de madeira e com painéis incorporando outro tipo de resíduos agroalimentares (fibra de casca de coco). Para responder ao objetivo principal, quatro objetivos específicos foram definidos, detalhados de seguida:

- Desenvolver um modelo e inventário de ciclo de vida para o painel de casca de arroz à escala laboratorial;
- Avaliar e comparar os impactes ambientais do ciclo de vida do painel de casca de arroz com um painel de fibra de coco, analisado por Freire et al. (2017), à escala laboratorial;
- Implementar um *scale up* para a escala industrial do modelo e inventário do painel de casca de arroz desenvolvido à escala laboratorial;
- Avaliar e comparar os impactes ambientais do ciclo de vida do painel de casca de arroz com um painel alternativo de fibra de coco, analisado por Freire et al. (2017), e com um painel convencional de fibra de madeira, analisado por Piekarski et al. (2017), à escala industrial.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo introdutório são descritos os objetivos da dissertação, é explicada a motivação e realizado um enquadramento do tema. No segundo capítulo são analisados estudos

publicados relativos às aplicações da casca de arroz e os estudos de ACV relevantes à realização desta tese. No terceiro capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados. No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por último, no quinto capítulo são apresentadas as principais conclusões, limitações e sugestões para investigação futura.

2. ESTADO DA ARTE: REVISÃO E ANÁLISE DA LITERATURA

O presente capítulo tem como objetivo rever e analisar estudos relevantes ao desenvolvimento desta tese. Primeiro foram analisados estudos relativos ao uso da casca de arroz em diferentes materiais de construção para demonstrar o potencial do uso deste resíduo. De seguida foram revistos estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de diferentes tipos de painéis (madeira e outros resíduos agroindustriais) e analisados de acordo com os seguintes critérios: tipo de produto; objetivo; fase de ciclo de vida; unidade funcional; método de avaliação de impacto e categorias de impacto ambiental. Estes estudos servirão de base à implementação do modelo de ACV do painel de casca de arroz desenvolvido nesta tese.

A revisão da literatura baseou-se em pesquisas em bases de dados científicas como o Science Direct, e também no motor de busca Google Académico, usando a combinação das seguintes palavras-chave: life cycle assessment, rice husk, scale up, particleboard, fiberboard MDF, MDP, coconut husk.

2.1 Aplicações da casca de arroz

Existem alguns estudos sobre a incorporação de casca de arroz em materiais de construção, nomeadamente no âmbito da utilização das cinzas de casca de arroz para aplicação em cimentos de forma a melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade dos mesmos (Prusty, Patro, and Basarkar 2016; Givi et al. 2010; van Tuan et al. 2011). Foram também estudados materiais compósitos, obtidos a partir de casca de arroz tratada quimicamente, reforçada com polietileno de alta densidade, de forma a melhorar o desempenho mecânico (Fávaro et al. 2010). Mais recentemente, foram analisadas a performance térmica, acústica e ambiental de amostras de casca de arroz e poliuretano, onde se verificou o potencial para a incorporação destes resíduos em materiais de construção com características de absorção sonora e isolamento térmico (Buratti et al. 2018). Neste estudo é apresentada uma avaliação ambiental simplificada de ciclo de vida.

Relativamente à utilização da casca de arroz para produção de painéis, existem vários estudos onde foram avaliadas as propriedades mecânicas fazendo variar tanto as condições da matéria-prima, através da aplicação de tratamento químico ou físico, como o tipo de aglutinante e as condições de produção do painel. Encontra-se em anexo um quadro resumo (A1) destes estudos e as principais informações relativas ao processo de produção.

2.2 Avaliação de ciclo de vida de painéis

Nesta secção irão ser apresentadas as principais características dos estudos de ACV analisados. Pode destacar-se que quatro dos artigos são relativos a painéis convencionais de fibra de madeira, e outros dois são artigos relativos a painéis de outros resíduos agroalimentares: fibra de casca coco e bagaço de cana-de-açúcar. Na Tabela 2.1 encontram-se representados os pressupostos mais relevantes dos estudos de ACV analisados como fase de ciclo de vida, unidade funcional, método de avaliação de impacte de ciclo de vida e categorias de impacte ambiental. De seguida é apresentada uma descrição mais detalhada dos estudos.

Tabela 2.1 Características dos estudos de ACV de painéis

Referência	Tipo de produto	Objetivo	Fase de ciclo de vida	Unidade funcional	Método de avaliação de impacte	Categorias de impacte ambiental
1. Piekarski et al. (2017)	Painel MDF madeira	ACV de um painel de fibra de madeira	Do berço ao portão	1 m ³ de painel	CML (2001) e USEtox (2008)	AC, AG, EU, ET, FFT, TH, DA, OD,
2. Silva et al. (2013)	Painel MDP madeira	ACV de um painel de partículas de madeira no Brasil	Do berço ao portão	1 m ³ de painel	CML e USEtox	DA, AC, AG, EF, OF, ET, TH
3. Kouchaki-Penchah et al (2016)	Painel MDP madeira	ACV da produção de um painel de partículas de madeira na República Islâmica do Irão	Do portão à porta	1 m ³ de painel	CML-IA baseline method	DA, AC, EF, AG, DCO, TH, ED, EM, ET, OF
4. Ferro et al. (2018)	Painel OSB madeira	ACV de um painel de partículas de madeira produzido no Brasil	Do berço ao portão	1 m ³ de painel	ReCiPe Midpoint	AG, DCO, AT, EF, TH, FFT, ET, ED

5. Uemura Silva et al. (2021)	Painéis de partículas de madeira reciclada e biopolímeros	ACV comparativo entre painéis convencionais e painéis de madeira e biopolímeros	Do berço ao portão	1 cm ³ de painel com densidade média de 0.62 kg e densidade alta de 0.8kg	CML2001, USEtox 2.1	DA, AC, EF, AG, FOF, TH,
6. Freire et al. (2016)	Painel de de casca de coco	ACV de um painel de fibra de casca de coco	Do berço ao portão	Escala laboratorial 6,05*10 ⁻⁵ m ³ de painel Escala piloto 1 m ³ de painel	-	DRH, US, DRM, AC, AT, ED, EM, AG, DCO, FOF, FMP, RI, TH, and ED
7. Santos et al. (2014)	Painel de bagaço de cana-de-açúcar	ACV de um painel de madeira no Brasil	Do berço à cova	1 m ² de painel	EDIP method – folha de cálculo	CRR, CRN, CRE, AG, FOF, AC, EF, TH
8. Ramos et al. (2021)	Painel de partículas de espiga de milho	Desempenho térmico e avaliação de ciclo de vida de um painel de partículas de espiga de milho	Do berço à cova	Massa (kg) de material necessário para um painel cuja resistência térmica é de 1m ² C/W	CML 2001	AG, DCO, AC, AF, TH

Categorias de impacto: Depleção Abiótica (DA), Acidificação (AC), Eutrofização (EF), Aquecimento Global (AG), Depleção da Camada de Ozono (DCO), Toxicidade Humana (TH), Ecotoxicidade de Água Doce (ED), Ecotoxicidade Marinha (EM), Ecotoxicidade Terrestre (ET), Oxidação Fotoquímica (OF), Formação Fotoquímica da Troposférica (FFT), Formação de Ozono Fotoquímico (FOF), Ecotoxicidade (ET), Formação de Matéria Particulada (FMP), Radiação Ionizante (RI), Depleção dos Recursos Hídricos (DRH), Uso do Solo (US), Acidificação terrestre (AT), Depleção dos Recursos Minerais (DRM), Consumo de Recursos Renováveis (CRR), Consumo de Recursos Não Renováveis (CRNR), Consumo de Recursos Energéticos (CRE).

Relativamente aos painéis de madeira, por serem o tipo convencional de painéis, possuem maior quantidade de informação acerca dos processos de produção e mais estudos de Avaliação de Ciclo de Vida. Existem diferentes tipos de painéis de madeira consoante as características que possuem, sendo que os mais comuns são: Painéis de fibra de média densidade (*Medium Density Fibreboard, MDF*), Painéis de fibra de alta densidade (*High*

Density Fibreboard, HDF) e painéis de partículas de média densidade (*Medium Density Particleboard, MDP*) e Aglomerados de partículas longas e orientadas de madeira (*Oriented Strand Board, OSB*).

Piekarski et al. (2017) avaliou o ciclo de vida de painéis MDF produzidos no Brasil segundo uma perspectiva do berço ao portão, ou seja, desde a extração da matéria-prima até ao momento de saída da fábrica de produção do painel. O objetivo do estudo consistiu em avaliar alternativas de modo a melhorar o ciclo de vida ambiental destes painéis. A unidade funcional adotada foi 1 m³ de painel MDF com espessura média de 16mm, densidade média de 683 kg/m³, sem revestimento de superfície. Os métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida e as categorias de impacto encontram-se anteriormente descritos na Tabela 2.1. Foram considerados como pontos críticos (*hotspots*) o consumo de gás natural na central térmica, a resina ureia-formaldeído, o consumo de lascas de madeira e o transporte de lascas de madeira para a fábrica. De modo a melhorar o cenário em questão foram propostas ações de eliminação de gás natural na central, reduzir o consumo de energia elétrica, reduzir ou substituir o consumo de resina ureia-formaldeído, reduzir o consumo de madeira e minimizar a distância dos fornecedores de lascas de madeira, conseguindo reduções de impactos de cerca de 30 % em quatro das categorias analisadas.

Silva et al. (2013) propôs oportunidades de melhoria de painéis de partículas de média densidade através da avaliação de ciclo de vida segundo uma perspectiva do berço ao portão. A unidade funcional adotada foi de 1 m³ de painel produzido no Brasil considerando dois subsistemas principais: produção florestal e industrial. Os pontos críticos identificados foram o uso de óleo combustível pesado (*heavy fuel oil, HFO*) como fonte de energia térmica no processo de manufatura e a produção da resina de ureia-formaldeído, usada como aglutinante. O glifosato usado no solo nas operações florestais é o principal responsável pelos impactos ao nível de ecotoxicidade. Foram avaliados diferentes cenários para a substituição do HFO e os resultados mostraram que a substituição de HFO por resíduos de madeira no moinho ou gasóleo conduz a uma redução dos impactos ambientais.

Kouchaki-Penchah et al. (2016) documentou o inventário de ciclo de vida da produção de painéis de partículas de madeira no Irão e a respetiva avaliação de ciclo de vida. O estudo avalia os impactos ambientais das matérias-primas e processos durante a produção dos painéis, incluindo consumos energéticos. As conclusões indicam que a eletricidade contribui com maior relevância para as categorias de acidificação e depleção da camada de ozono, enquanto o transporte e o processo de produção contribuem para maiores impactos na ecotoxicidade marinha e oxidação fotoquímica. Foi proposta a substituição do gás natural, e os resultados mostraram que, com exceção de algumas categorias de impacto, a utilização de fontes alternativas de energia térmica, como os resíduos de madeira, poderiam melhorar as emissões provenientes do processo de fabrico.

Ferro et al. (2018) avaliou os impactos ambientais associados à produção de OSB com o objetivo de propor alternativas de modo a melhorar o seu perfil ambiental. Foi realizada uma avaliação de ciclo de vida, segundo uma perspectiva do berço ao portão cuja unidade funcional selecionada foi 1 m³ de painel OSB produzido no Brasil. O sistema de produção foi dividido em dois subsistemas: operações florestais e fábrica de produção, sendo que é o segundo subsistema que mais contribui para todas as categorias de impactos analisadas. A produção do químico que é aplicado nos painéis para aumentar a sua resistência ao ataque por organismos em decomposição da madeira, foi a fase com maior contribuição para quatro das categorias de impacto selecionadas. Foram propostos cenários baseados na substituição do químico e os resultados mostraram que a substituição poderia levar a uma redução de impactos ambientais em cerca de 30 %.

Uemura Silva et al. (2021) comparou os impactos ambientais dos painéis de partículas de madeira convencionais com painéis de partículas de madeira reciclada e biopolímeros. Dos resultados da avaliação de ciclo de vida, concluiu-se que a abordagem segundo uma economia circular reduzia mais de 95% dos impactos ambientais para a toxicidade humana, depleção abiótica e outros impactos, quando comparados com os painéis tradicionais que seguem uma abordagem de economia linear.

Relativamente aos painéis de resíduos agroalimentares, a quantidade e o tipo de informação é bastante limitada uma vez que o desenvolvimento destes produtos é relativamente recente. Assim sendo, foram apenas selecionados três artigos incorporando diferentes resíduos agroalimentares, a casca de coco, o bagaço da cana-de-açúcar e espiga de milho.

Freire et al. (2017) avaliou os impactos ambientais de painéis de fibra da casca de coco, em fase inicial de desenvolvimento, numa perspectiva do berço ao portão. Uma vez que estes painéis se encontram numa fase inicial de desenvolvimento, a avaliação realizou-se à escala laboratorial e compreendeu a produção de três tipos diferentes de painéis: painel de alta densidade, painel de média densidade com aglutinante e painel de média densidade sem aglutinante. Posteriormente os dados sofreram um processo de escalonamento da escala laboratorial para escala piloto. A unidade funcional adotada para a escala laboratorial e piloto foi de $6.05 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ e 1 m³, respetivamente. O transporte e processamento da casca de coco, assim como a cultura do coco, foram identificados como pontos críticos do impacto ambiental destes painéis. Foram propostas duas medidas de melhoria para o desempenho ambiental dos painéis de MDF e HDF: medidas a curto prazo, centradas na redução de distâncias de transporte e reutilização de efluentes ricos em nutrientes do processamento de cascas na irrigação de culturas; e medidas a longo prazo, centradas na redução da dependência da cultura do coco em fertilizantes comerciais e melhoria na eficácia da irrigação.

Dos Santos et al. (2014) realizou uma avaliação de ciclo de vida comparativa entre painéis que incorporam bagaço de cana-de-açúcar e aparas de madeira de pinho, segundo

uma perspectiva do berço à cova, ou seja, desde a extração da matéria-prima até à saída da fábrica. A unidade funcional utilizada foi 1 m² de painel, considerando um tempo de vida médio de oito anos. O estudo incluiu a aquisição da matéria-prima, produção dos painéis, utilização e final de vida. Os resultados indicaram que o painel de madeira apresenta maiores impactes ambientais comparativamente ao painel de bagaço de cana-de-açúcar. Os fatores que contribuíram mais significativamente para o aumento dos impactes ambientais foram a distância entre as matérias-primas e o local de produção, e as emissões de formaldeído. O primeiro está relacionado com a combustão de combustíveis fósseis durante a aquisição de matéria-prima, e o segundo, está relacionado com a utilização de resina ureia-formaldeído, responsável pelas emissões de formaldeído para o ar durante a produção.

Ramos et al. (2021) avaliou o desempenho térmico e o ciclo de vida de um painel de partículas de espiga de milho usando dois tipos de aglutinante, onde foram consideradas as fases de produção e de fim de vida (incineração e aterro). Os resultados revelaram que ambos os painéis possuem potencial para serem usados em como um material de construção sustentável para isolamento de paredes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da avaliação de ciclo de vida do painel de casca de arroz. O capítulo possui quatro subcapítulos: o primeiro subcapítulo descreve a metodologia de avaliação de ciclo de vida do painel; o segundo subcapítulo apresenta a definição do objetivo e âmbito; o terceiro subcapítulo descreve o desenvolvimento dos inventários de ciclo de vida à escala laboratorial e industrial, incluindo o processo de obtenção dos dados e escalonamento da escala laboratorial para a escala industrial; e no último subcapítulo são apresentadas as categorias de impacto analisadas.

3.1 Metodologia de avaliação de ciclo de vida

A avaliação de ciclo de vida é uma metodologia frequentemente usada para avaliar os impactos ambientais de um produto, material ou processo. É um método abrangente capaz de avaliar todos os impactos ambientais diretos e indiretos ao longo de todo o ciclo de vida de um sistema de produto, desde a extração e aquisição de matérias-primas, até à utilização e eliminação final, passando pela produção e fabrico, utilização de energia e materiais. (Brusseau 2019) (ISO 14040:2006). A metodologia de ACV compreende quatro fases:

- Definição de âmbito e objetivo, onde se inclui a descrição do sistema em termos das suas fronteiras e unidade funcional;
- Análise de inventário, que consiste na recolha e organização de dados e procedimentos de cálculo para quantificar todas as entradas e saídas relevantes ao sistema em estudo;
- Avaliação de impactos, que compreende o cálculo das potenciais contribuições para as categorias de impacto consideradas em análise, com a finalidade de caracterização e avaliação dos efeitos das cargas ambientais consideradas no inventário de CV;
- Interpretação de resultados, onde os resultados são resumidos e discutidos servindo como base para conclusões, recomendações e tomadas de decisão de acordo com a definição de objetivo e âmbito. Esta interpretação deve ser efetuada interactivamente ao longo de todas as outras fases. (ISO 14040:2006)

A metodologia de investigação desenvolvida nesta tese encontra-se representada na Figura 3.1. Tendo em conta a fase inicial de desenvolvimento do painel em estudo, a metodologia de ACV foi adaptada de forma a ser aplicada de uma forma prospectiva. A definição do objetivo e âmbito resultaram da análise de vários estudos laboratoriais de

painéis que incorporam casca de arroz e posterior seleção do painel com maior potencial de utilização. Assim, o painel apresentado por Marques et al. (2020) produzido à escala laboratorial, apresentou as melhores propriedades de comportamento mecânico, térmico e foi usado para o desenvolvimento do inventário à escala laboratorial. Uma vez que não existiam dados relativos às necessidades energéticas para o processamento dos painéis, utilizou-se um estudo de Freire et al. (2017) sobre a produção de painéis de fibra de casca de coco produzidos à escala laboratorial, onde os gastos de energia foram discriminados por processo de fabrico. Posto isto, procedeu-se à construção do fluxograma. Para a elaboração do inventário à escala industrial, foi aplicado um método de escalonamento através da adaptação de processos industriais semelhantes baseado em dados dos estudos de Piekarski et al. (2017) e Silva et al. (2013) de ACV de painéis de madeira. Adicionalmente, tendo em conta a incerteza associada ao consumo de energia, foi realizada uma análise de cenários para a produção de painéis de casca de arroz assumindo diferentes fontes e necessidades energéticas: cenário A, com base no estudo de Piekarski et al. (2017) e cenário B, com base no estudo de Silva et al. (2013). Posteriormente foram calculados os impactos de ciclo de vida do painel. Em paralelo realizou-se uma comparação entre os impactos da produção de painéis de casca de arroz e a produção de painéis de outros resíduos. Para a escala laboratorial comparou-se o painel de casca de arroz com um painel de casca de coco, também em fase de desenvolvimento, e à escala laboratorial comparou-se o painel de casca de arroz com um painel de madeira produzido em Portugal e no Brasil, e com um painel de casca de coco.

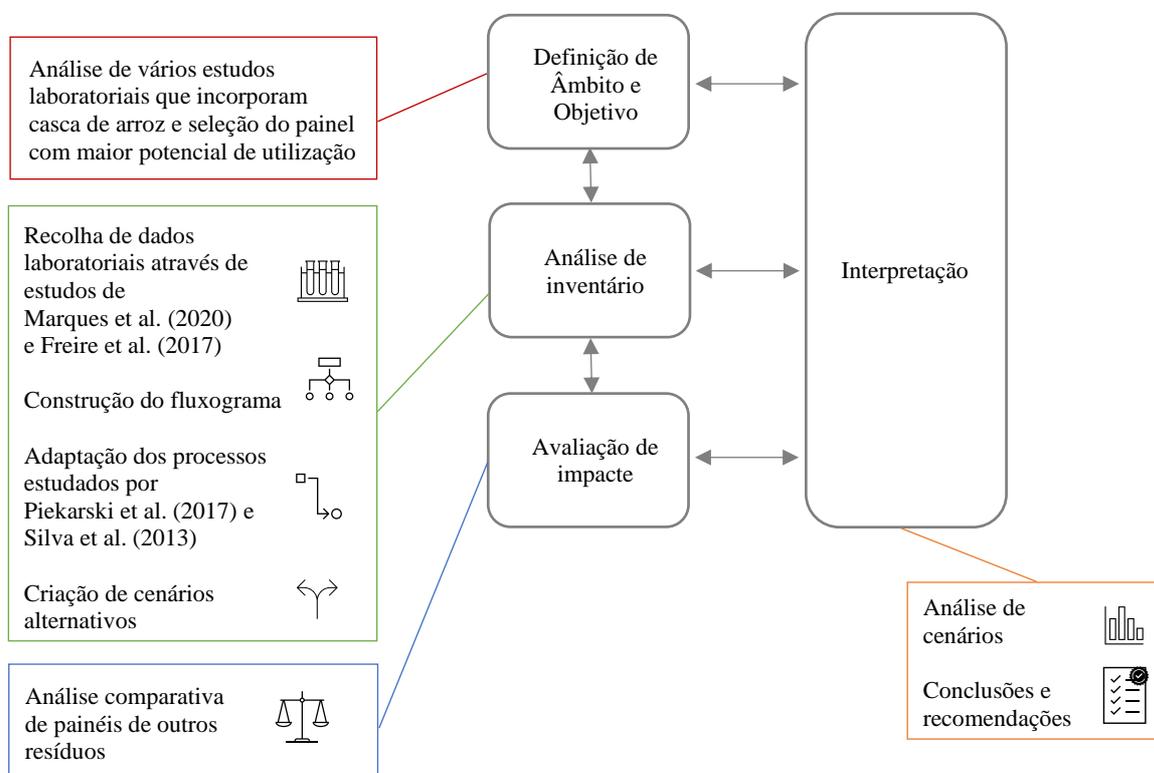


Figura 3.1 Estratégia de avaliação de ciclo de vida. Adaptado de ISO 14040:2006 e Müller et al. (2022).

3.2 Definição de objetivo e âmbito

Este estudo tem como objetivo avaliar os potenciais impactes ambientais de painéis de casca de arroz produzidos à escala industrial, em Portugal, e compará-los com os impactes ambientais de painéis convencionais de madeira e de outros resíduos agroalimentares. Para isso, procedeu-se à ACV de painéis produzidos à escala laboratorial, implementou-se um *scale up* para escala industrial do modelo e dos dados e, por fim, realizou-se a avaliação de ciclo de vida do painel de casca de arroz produzido industrialmente. A Figura 3.2 ilustra o resíduo da casca de arroz e o painel selecionado para o estudo de ACV.



Figura 3.2 Casca de arroz e painel de casca de arroz produzido em laboratório. Fonte: Marques et al. (2020)

Foi desenvolvido um modelo de ciclo de vida do painel numa perspetiva do berço ao portão, ou seja, desde a produção da matéria prima até à saída do painel na fábrica. A casca de arroz foi modelada considerando que é um resíduo, visto que atualmente não tem qualquer valor comercial, portanto, não foram considerados os processos de plantação e cultivo do arroz. Assim, o ciclo de vida do painel começa com o transporte da casca de arroz, seguido da mistura da casca com o aglutinante, prensagem, secagem natural e, por fim, o polimento. A Figura 3.3 apresenta a fronteira do sistema à escala industrial (verde) e à escala laboratorial (amarelo), onde as principais diferenças se encontram nas fontes de energia utilizadas, que serão detalhadas no próximo subcapítulo, e a inclusão do transporte do resíduo desde o local de extração até à fábrica de produção de painéis. À escala laboratorial este processo não é significativo não tendo sido, por isso, considerado.

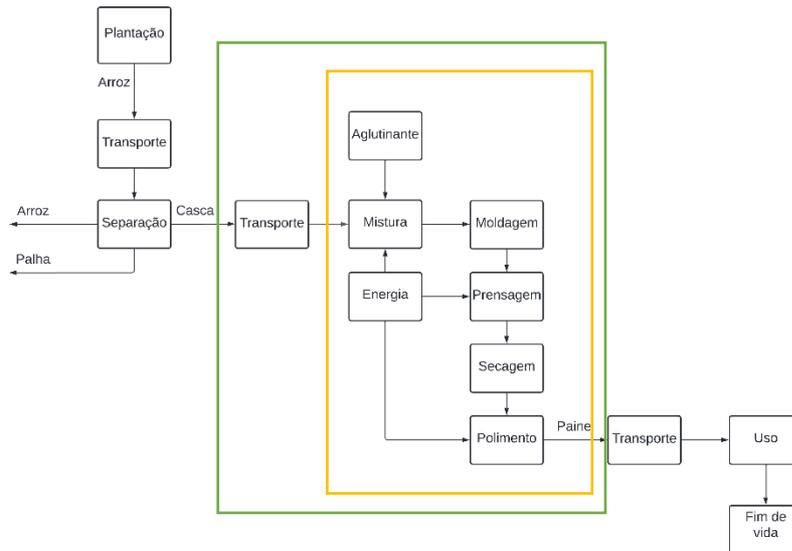


Figura 3.3 Fluxograma de ciclo de vida do painel de casca de arroz e fronteiras do sistema (do berço ao portão) para a escala laboratorial (verde) e industrial (amarelo).

No que se refere aos impactos dos processos a jusante da saída da fábrica, nomeadamente o transporte, utilização e fim de vida, estes foram negligenciados. Além de não existir dados disponíveis que indiquem relevância destes processos (devido à fase inicial de desenvolvimento do painel), os painéis que se encontram no mercado e que estarão sujeitos a comparação, encontram-se nas mesmas condições dos painéis de casca de arroz após saída da fábrica, não havendo grande significância em considerar estes processos.

A unidade funcional é definida de modo a fornecer uma referência para a qual as entradas e saídas são relacionadas, a fim de assegurar a comparabilidade de resultados. Neste estudo a unidade funcional adotada foi de 1 m³ de painel de casca de arroz para revestimento (para utilização durante 15 anos).

3.3 Modelo e Inventários de ciclo de vida

O desenvolvimento do inventário da produção dos painéis de casca de arroz baseou-se no estudo de Marques et al. (2020) acerca do comportamento mecânico, térmico e acústico de um painel de casca de arroz produzido à escala laboratorial com densidade de 390 kg/m³. Foram recolhidos dados relativos aos processos e materiais usados na produção do painel de casca de arroz e com esta informação foi possível proceder à construção do inventário constituído pelas entradas e saídas do sistema da produção. Para obter informação adicional não disponível no estudo, como necessidades energéticas para a produção do painel, realizou-se uma adaptação de um estudo relativo à produção de painéis de fibra de casca de coco, realizado à escala laboratorial, uma vez que as condições de prensagem eram semelhantes Freire et al. (2017). Desta forma foi possível

obter os consumos de energia especificados por processo e adaptá-los ao modelo do painel de casca de arroz.

A Tabela 3.1 apresenta o inventário de entradas e saídas da produção à escala laboratorial de 1 m³ de painel de casca de arroz. O painel é constituído por 312 kg de casca de arroz, e 78 kg de aglutinante, correspondendo a 80 % e 20 % do peso total do painel, respetivamente. Relativamente à energia de prensagem e polimento estimou-se que seriam necessários 3881.4 kWh de energia elétrica. Paralelamente, de forma a estabelecer uma relação comparativa com um painel de um outro resíduo, também em fase inicial de desenvolvimento, é apresentado nesta tabela, o inventário implementado por Freire et al. (2017) de entradas e saídas da produção laboratorial de um painel de fibra de casca de coco, que será designado daqui em diante por painel de casca de coco. Os dados apresentados são referentes à produção laboratorial de 0.0000605m³ de painel, sendo adaptados através de uma proporção direta à unidade funcional adotada neste estudo.

Tabela 3.1 Inventário para a produção à escala laboratorial do painel de casca de arroz (1 m³) e do painel de casca de coco com e sem aglutinante UF (1 m³ e 0,0000605 m³).

		Casca de arroz		Casca de coco		
		1 m ³		1 m ³	0,0000605 m ³	
Entradas			MDF	MDF-UF	MDF	MDF-UF
Água	L	-	-	0.22	-	0.000013125
Eletricidade	kWh	3881.4	10578.51	19214.9	0.46	0.9375
Aglutinante ureia-formaldeído (UF)	kg	-	-	222.7	-	0.013475
Aglutinante	kg	78	-	-	-	-
Parafina	kg	-	-	35.64	-	0.00215625
Sulfato de amónia	kg	-	-	0.29	-	0.0000175
Casca de arroz	kg	312	-	-	-	-
Coir de coco	kg	-	2975.2	2892.6	0.18	0.175

Fibra de coco	kg	-	5454.6	413.2	0.33	0.025
Saídas						
Painel	kg	390	763.9	954.96	0.0462	0.0578

É possível observar uma grande diferença de necessidades energéticas para a produção dos painéis de diferentes resíduos. A energia necessária para a produção do painel de casca de coco é bastante elevada, uma vez que inclui o processamento da casca, secagem da fibra e prensagem do painel. Para a produção do painel de casca de arroz não é necessário qualquer tipo de processamento do resíduo (Marques et al. 2020), sendo o processo de prensagem o único consumo energético considerado.

Tendo em consideração que, até à data, não existe documentação relativa à produção de painéis de casca de arroz a nível industrial, de forma a ser possível efetuar uma avaliação de ciclo de vida do painel de casca de arroz a essa escala, foi necessário realizar um escalonamento dos dados laboratoriais. Este processo consistiu em adaptar os processos de produção e os inventários de entradas e saídas de materiais, assim como necessidades energéticas para a produção do produto em estudo, da escala laboratorial para a escala industrial.

No processo de escalonamento foram considerados os seguintes pressupostos:

- Os processos da escala industrial são os mesmos que na escala laboratorial, tal como se encontra esquematizado na Figura 3.4;
- A quantidade das entradas, exceto consumos de energia, e saídas cresce linearmente com o aumento da produção;
- As condições de prensagem do painel são semelhantes às condições de prensagem do painel de madeira estudado por Piekarski et al. (2017) e por Silva et al. (2013);
- A utilização das diferentes fontes de energia, térmica e elétrica, para a produção de painéis de casca de arroz é equivalente à da produção do painel de madeira estudado por Piekarski et al. (2017) e por Silva et al. (2013);
- A biomassa a utilizar para geração de energia térmica será proveniente da casca de arroz em vez de madeira. De acordo com Shen et al. (2012) o valor do poder calorífico superior é de 15.4 MJ/kg;
- As necessidades energéticas foram adaptadas tendo em consideração a massa dos painéis.

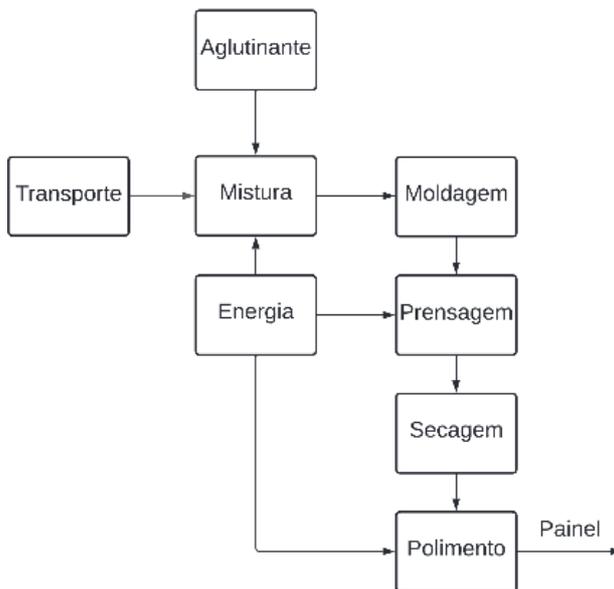


Figura 3.4 Processos considerados no ciclo de vida do painel de casca de arroz.

Relativamente às fontes de energia, sabe-se que na produção laboratorial é utilizada apenas energia elétrica, enquanto na produção industrial, para além de energia elétrica são utilizadas outras fontes de energia. Tendo em conta a incerteza associada ao consumo de energia, foram considerados dois cenários para a produção de painéis de casca de arroz assumindo diferentes fontes e necessidades energéticas: cenário A, que tem como base o estudo de Piekarski et al. (2017) e cenário B, que tem como base o estudo de Silva et al. (2013).

O cenário A foi implementado baseado no modelo desenvolvido por Piekarski et al. (2017), onde foram disponibilizadas informações relativas à quantidade de energia necessária de cada processo, nomeadamente energia para prensagem, mistura e polimento de 1 m³ de painel de madeira. Dos dados analisados, foi obtido um valor total de 280 kWh de eletricidade para o processo de produção e, para geração de energia térmica, cerca de 168 kg de madeira (combustível) e 17 m³ de gás natural. Os processos de geração de vapor e ar quente para a digestão das lascas e secagem das fibras de madeira consomem cerca de 80 % da energia térmica produzida e o processo de aquecimento de óleo térmico para a prensagem consome cerca de 20 %. Relativamente à utilização de gás natural, é também referido que 23 % do gás é usado nos processos de digestão e secagem e 77 % no processo de prensagem. No anexo A2 encontra-se o fluxograma correspondente ao ciclo de vida deste painel. Esta informação foi sistematizada e adaptada à produção do painel de casca de arroz, excluindo os consumos energéticos dos processos de geração de vapor e ar quente para digestão das lascas e secagem das fibras, que não existem na produção do painel de casca de arroz.

O cenário B foi baseado no estudo de Silva et al. (2013) assumindo diferentes necessidades e fontes de energia. Assumiu-se que a alocação da energia por processo era semelhante à do cenário A, mas com valores e fontes de energia diferentes, ou seja, manteve-se a proporção de 80 % da energia térmica produzida para os processos de geração de vapor e ar quente para a digestão das lascas e secagem das fibras, e 20 % para o processo de aquecimento do óleo térmico para prensagem. Em vez de gás natural, foi considerado gás liquefeito do petróleo, mas com as mesmas proporções de 23 % do gás ser utilizado nos processos de digestão e secagem e 77 % no processo de prensagem. Esta informação foi sistematizada e adaptada à produção do painel de casca de arroz, tal como no cenário A, excluindo os consumos energéticos dos processos de geração de vapor e ar quente para digestão das lascas e secagem das fibras.

Relativamente ao transporte, assumiu-se que a empresa de produção de painéis se localiza na zona Centro de Portugal, e que os locais de extração de cascas de arroz estejam localizados a uma média de 130 km da fábrica. Assim sendo, o transporte da matéria-prima desde o local de separação da casca do arroz até à fábrica de produção dos painéis é feito através de um camião com capacidade de carga de 10 toneladas ao longo de uma distância de 130 km.

Posto isto, procedeu-se à elaboração do inventário da produção à escala laboratorial de 1 m³ de painel de casca de arroz, que está descrito na Tabela 3.2. O painel de casca de arroz é constituído por 312 kg de casca de arroz e 78 kg de aglutinante. Relativamente às necessidades energéticas, estimou-se que, para o cenário A um valor de energia elétrica de 159,9 kWh e, para energia térmica, um valor de 7,7 m³ de gás natural e 102,5 kg de combustível na forma de casca de arroz. Para o cenário B, a distribuição das diferentes fontes de energia por processo é igual à do cenário A, mas as necessidades energéticas são distintas, correspondendo a um valor de 138,1 kWh de energia elétrica e para geração de energia térmica 0.18 kg de gás liquefeito do petróleo e 327 kg de casca de arroz

Em paralelo, na Tabela 3.2, encontram-se os inventários da produção industrial de 1 m³ de painel de resíduos de madeira desenvolvido por Piekarski et al. (2017) e de 1 m³ de painel de resíduos de casca de coco, desenvolvido à escala piloto por Freire et al. (2017) para efeitos comparativos. Esta comparação tem como finalidade estabelecer uma relação entre as necessidades de materiais e energia da produção de um painel de resíduos de arroz em fase de desenvolvimento, com um painel de resíduos de madeira atualmente comercializado e com um painel de resíduos de casca de coco em fase de desenvolvimento.

Tabela 3.2 Inventário para a produção industrial (scale up) de 1 m³ de painel de casca de arroz, casca de coco e de madeira

Entradas	Casca de arroz		Casca de coco		Madeira	
	Cenário A	Cenário B	MDF	MDF- UF	MDF	
Matéria-prima						
Lascas de madeira (Eucalipto)	kg	-	-	-	-	80.7
Lascas de madeira (Pinheiro)	kg	-	-	-	-	617
Coir de coco	kg	-	-	2937.2	2363.3	-
Fibra de coco	kg	-	-	542.5	413.4	-
Casca de arroz	kg	312	312	-	-	-
Químicos						
Aglutinante ureia-formaldeído, UF	kg	-	-	-	178.2	70.3
Aglutinante	kg	78	78	-	-	-
Parafina	kg	-	-	-	28.5	3.4
Sulfato de amónia	kg	-	-	-	0.23	0.1
Ureia	kg	-	-	-	-	0.8
Eletricidade						
Eletricidade	kWh	159.9	138.1	265.5	280.5	280
Combustíveis						
Gás Natural	m ³	7.7	-	16.9	17.9	17.4
Gás liquefeito do petróleo	kg	-	0.18	-	-	-
Gasóleo	L	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Serragens (comprada)	kg	-	-	-	-	87.4
Serragens (geradas na fábrica)	kg	-	-	-	-	80.2
Casca de coco	kg	-	-	130.9	138.3	-
Casca de arroz	kg	102.5	327	-	-	-
Uso de água						
Água	L	-	-	-	173.2	132.5
Saídas						
Painel	kg	390	390	764	614	683.2

Na Tabela 3.3 encontra-se o inventário dos consumos de energia e materiais da produção de 1 m³ de painel de casca de arroz à escala laboratorial, os consumos adotados no processo de escalonamento e os consumos relativos da escala laboratorial para a escala industrial. É possível observar que em ambas as hipóteses as matérias-primas se mantêm constantes devido ao escalonamento linear efetuado, no entanto nos consumos

energéticos isto não se verifica, existindo uma diminuição acentuada do consumo de energia elétrica (36-45 %) e incluindo outras formas de energia.

Tabela 3.3 Inventário da produção de 1 m³ painel de casca de arroz para a escala laboratorial e industrial

Painel		Escala laboratorial	Escala industrial		Δ (lab-industrial, cenário A)	Δ (lab-industrial, cenário B)
			Cenário A	Cenário B		
Materials						
Casca de arroz	kg	312	312	312	0 %	0 %
Aglutinante	kg	78	78	78	0 %	0 %
Energia						
Eletricidade	kwh	3881.4	160	138	95 %	96 %
Gás Natural	m ³	-	7.7	-	-	-
Gás liquefeito do petróleo	kg	-	-	0.18	-	-
Casca de arroz (biomassa)	kg	-	103	327	-	-

3.4 Categorias de impacto ambiental

O método de avaliação de impacto de ciclo de vida, AICV, utilizado foi o EF 3.0 (adaptado), desenvolvido pela Comissão Europeia para ser utilizado no âmbito da iniciativa da pegada ambiental, *Environmental Footprint, EF* (European Commission, (2021), Fazio et al. (2018)). A seleção das categorias de impacto foi realizada com base na literatura e na declaração ambiental do produto do painel de madeira MDF, *Environmental Product Declaration, EPD*, que é uma forma verificada e standardizada de quantificar os impactos ambientais de um produto. Na Tabela 3.4 encontram-se as categorias de impacto selecionadas. A modelação dos impactos foi realizada recorrendo ao software *SimaPro 9*.

Tabela 3.4 Categorias de impacto ambiental

Categoria de Impacte	Unidade
Aquecimento global	kg CO ₂ eq
Depleção da camada de ozono	kg CFC11- eq
Formação de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq
Acidificação	mol H ⁺ eq
Eutrofização marinha	kg N eq
Eutrofização terrestre	mol N eq
Eutrofização água doce	kg P eq
Radiação ionizante	kBq U-235 eq
Uso de recursos fósseis	MJ
Uso de recursos minerais e metais	kg Sb eq

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

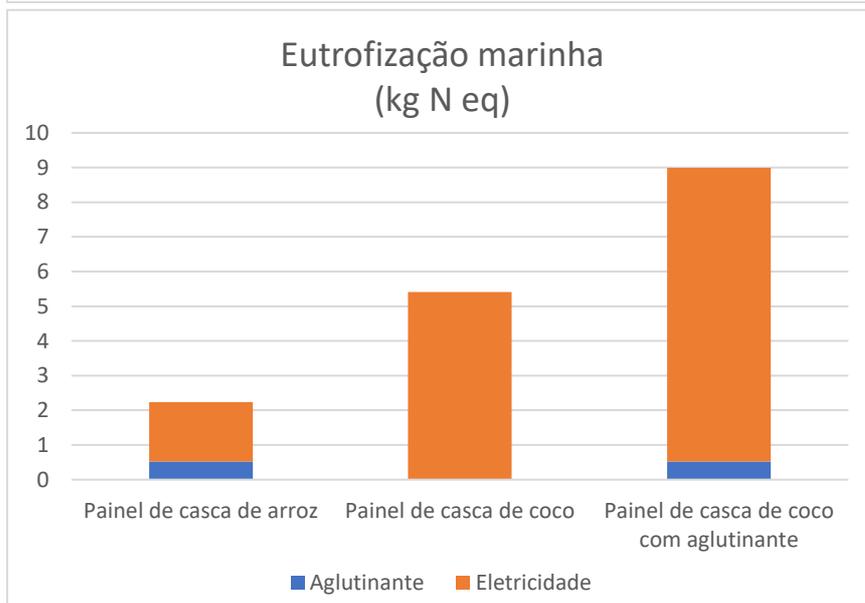
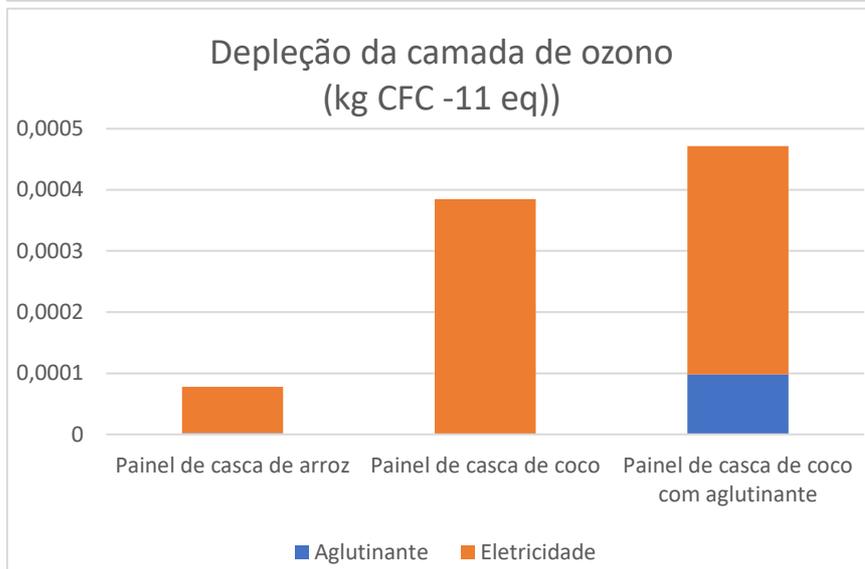
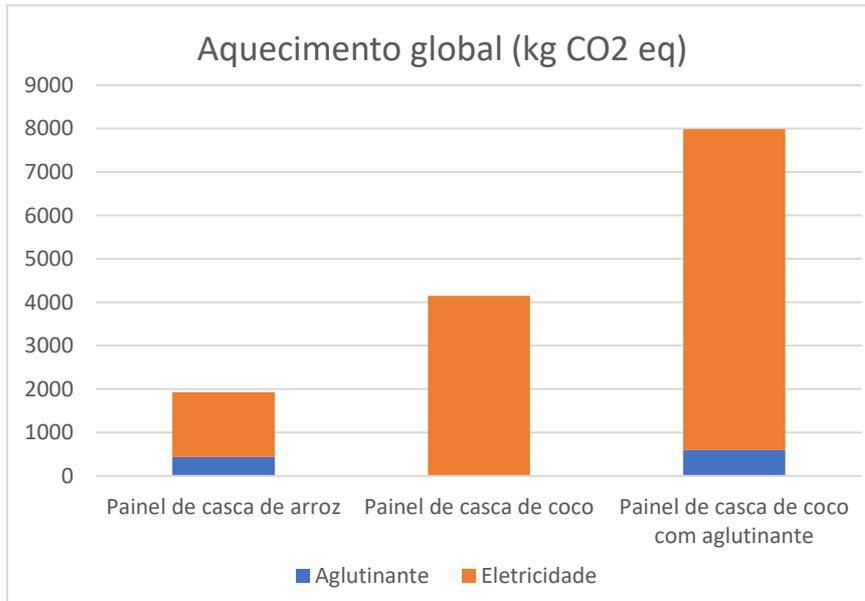
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. No subcapítulo 4.1 são apresentados os resultados da avaliação de impacto de ciclo de vida da produção do painel de casca de arroz à escala laboratorial, e a comparação com a produção do painel de casca de coco. No subcapítulo 4.2 são apresentados os resultados da avaliação de impacto de ciclo de vida do painel de casca de arroz à escala industrial comparado com um painel de madeira produzido em Portugal, bem como os resultados do painel de casca de coco à escala industrial comparado com um painel de madeira, ambos produzidos no Brasil.

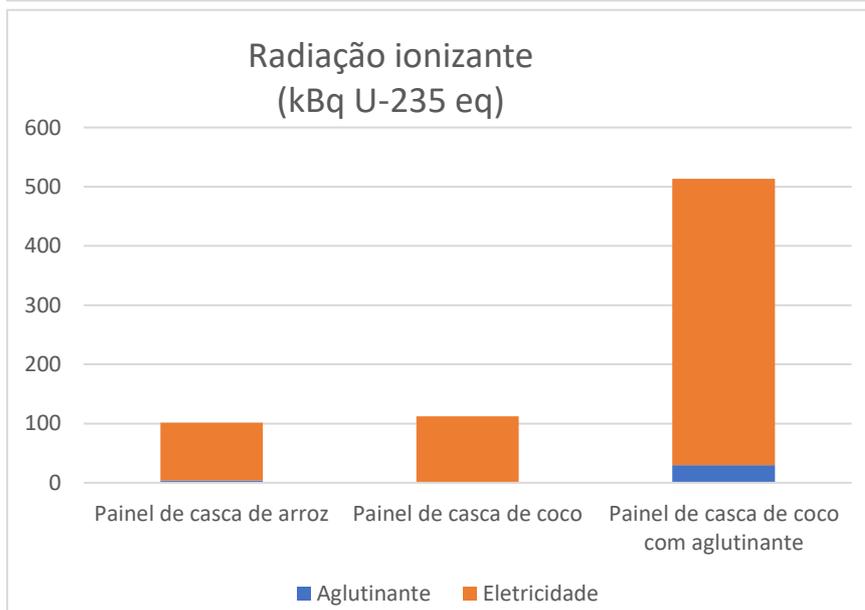
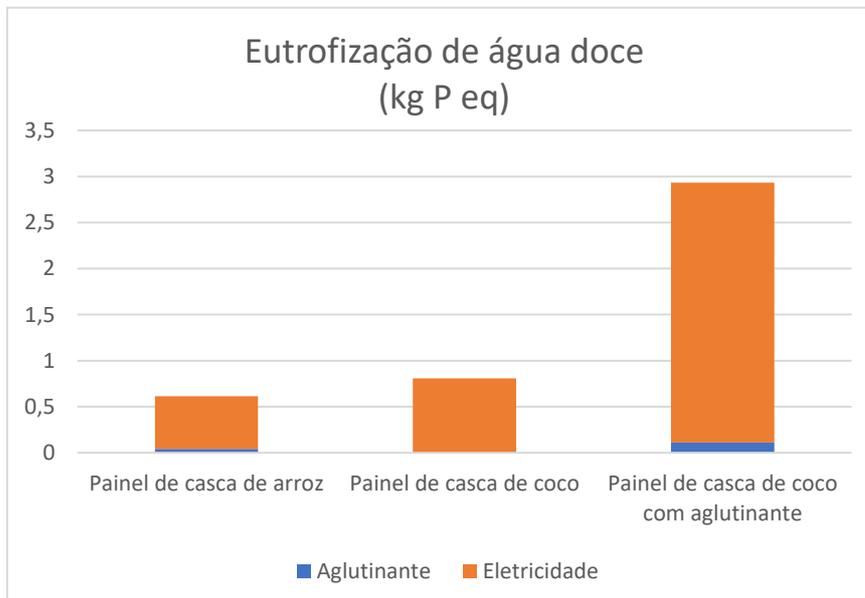
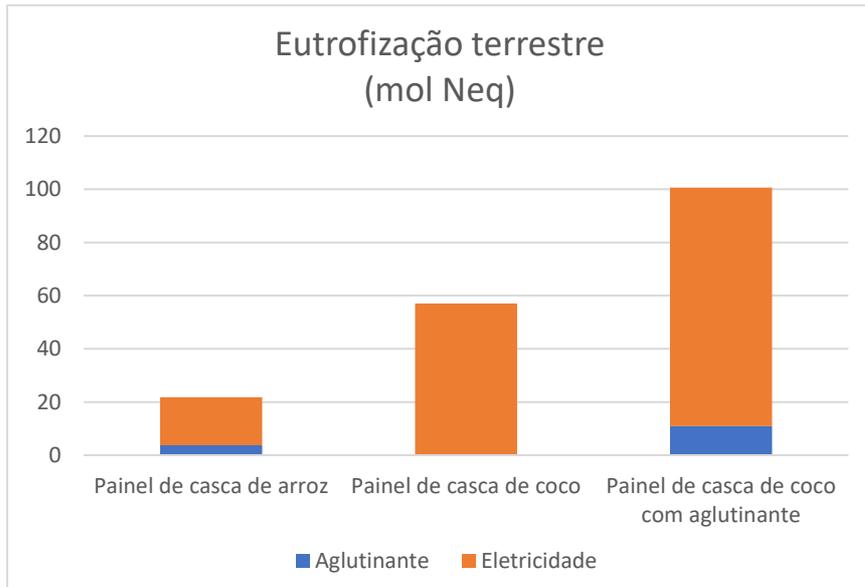
4.1 Avaliação de impactes de ciclo de vida – escala laboratorial

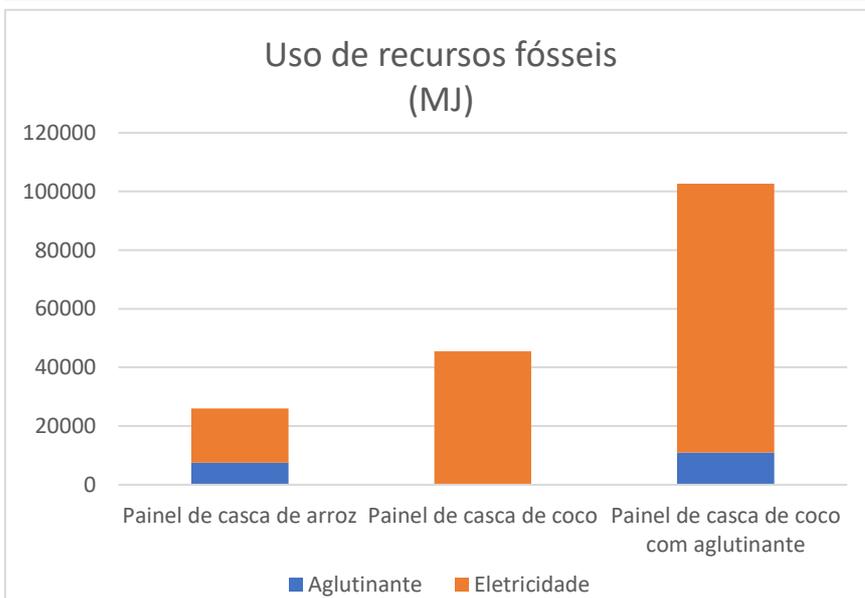
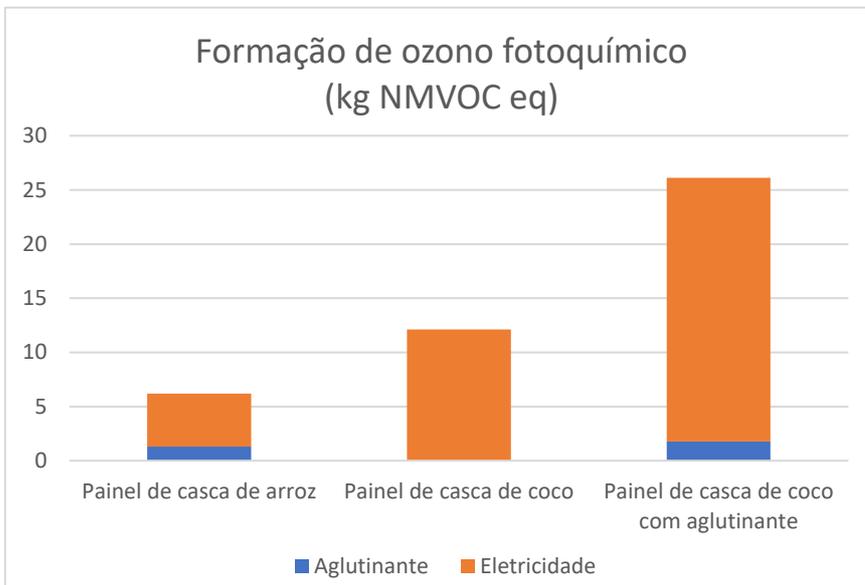
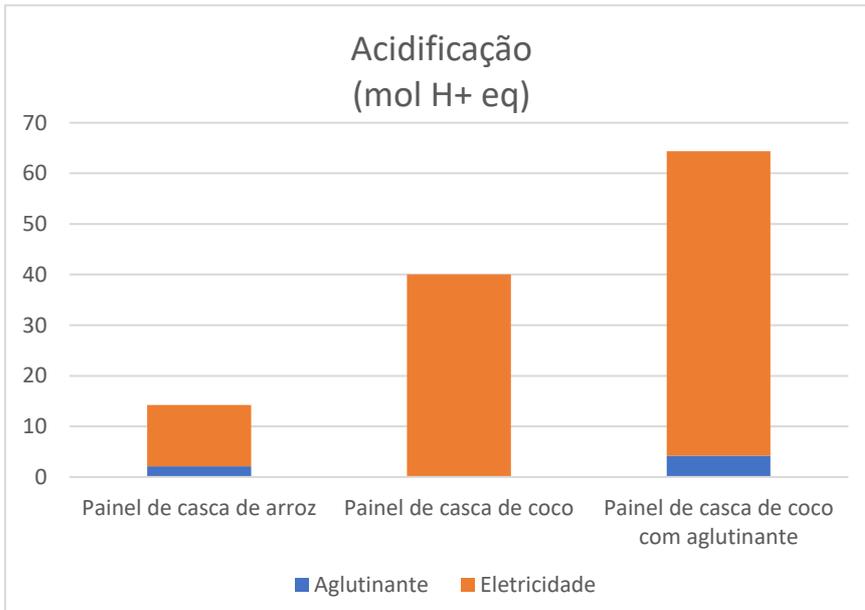
Neste subcapítulo são apresentados e avaliados os impactes ambientais do ciclo de vida da produção de 1 m³ de painel de casca de arroz à escala laboratorial, bem como da produção do painel de casca de coco com e sem aglutinante UF, adaptado de Freire et al. (2016). Adicionalmente, serão comparados os resultados obtidos por Freire et al. (2016) com os resultados obtidos neste estudo relativos ao painel de casca de coco, uma vez que o modelo foi replicado usando outro método de avaliação de impacto.

Na Figura 4.1 é possível observar que para todas as categorias, o painel de casca de arroz apresenta um melhor desempenho ambiental, seguido do painel de casca de coco sem aglutinante e painel de casca de coco com aglutinante. O processo que mais contribui para os impactes da produção do painel de casca de arroz é a utilização de eletricidade, cuja contribuição varia entre 71 % (uso de recursos fósseis) e 97 % (depleção da camada de ozono). Relativamente ao painel de casca de coco, o uso de eletricidade também é o processo com mais impactes, cuja contribuição é de 100 % para o painel de casca de coco sem aglutinante e para o painel de casca de coco com aglutinante varia entre 96 % (eutrofização de água doce e radiação ionizante) e 61 % (uso de recursos minerais e metais).

As diferenças visíveis entre os impactes associados à eletricidade da produção dos painéis de casca de coco e de casca de arroz podem ser justificadas principalmente com o facto da casca de coco necessitar de energia na fase de processamento do resíduo, o que não acontece com as cascas de arroz, e necessitar de mais energia na fase de prensagem.







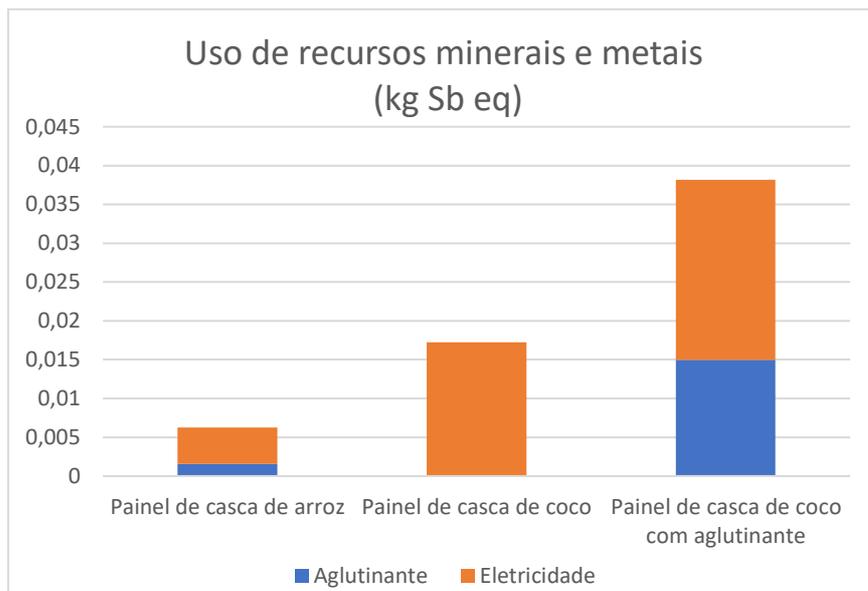


Figura 4.1 Impactes ambientais de CV de 1 m³ de painel de casca de arroz e casca de coco sem e com aglutinante UF produzido à escala laboratorial

Freire et al. (2017) concluiu que, à escala laboratorial, o principal ponto crítico é o processo de prensagem dos painéis, que requer a produção de eletricidade. Esta conclusão é equivalente à obtida na replicação do modelo com a aplicação do método de avaliação de impacto *Environmental Footprint*. A principal diferença entre os painéis é o tempo de prensagem do painel de casca de coco com aglutinante, que é mais do dobro do tempo de prensagem do painel sem aglutinante, fazendo com que haja mais impactes na produção, consequência do maior gasto energético.

4.2 Avaliação de impactes de ciclo de vida – escala industrial

Os resultados da avaliação de impacto ambiental para o painel de casca de arroz foram comparados com um painel de madeira produzido em Portugal, baseado no estudo de Piekarski et al. (2017) e adaptado para Portugal, nomeadamente o mix energético e as distâncias de transporte da matéria-prima até ao local de produção dos painéis (130 km). Adicionalmente os impactes de ciclo de vida do painel de casca de coco estudado por Freire et al. (2017) foram comparados com o painel de madeira desenvolvido por Piekarski et al. (2017) produzido no Brasil. Para esta análise, as aparas de madeira e a casca de coco são consideradas resíduos, para efeitos de comparação com os resultados dos impactes do painel de casca de arroz, considerando-se a mesma fronteira do sistema para todos os painéis analisados. O fluxograma de ciclo de vida destes painéis encontra-se em anexo (A2).

Na Figura 4.2 encontram-se representados os impactes ambientais de ciclo de vida de 1 m³ de painel produzido à escala industrial para os cenários A (eletricidade + gás natural e casca de arroz) e B (eletricidade + gás liquefeito do petróleo e casca de arroz) descritos no capítulo 3, e a comparação com 1 m³ de painel de madeira com produção em Portugal. Adicionalmente são apresentados os resultados da comparação de 1 m³ de painel de casca de coco com e sem aglutinante com um painel de madeira, produzidos no Brasil.

Para todas as categorias selecionadas, exceto para as categorias de alterações climáticas, eutrofização marinha e uso de recursos fósseis, o painel de casca de arroz (tanto no cenário A como no cenário B) apresenta o melhor desempenho ambiental, comparado com o painel de madeira. Nas categorias de impacte que são consideradas exceções, o que se verifica é que o desempenho do painel de casca de arroz tanto do cenário A como do B é pior do que o desempenho do painel de madeira.

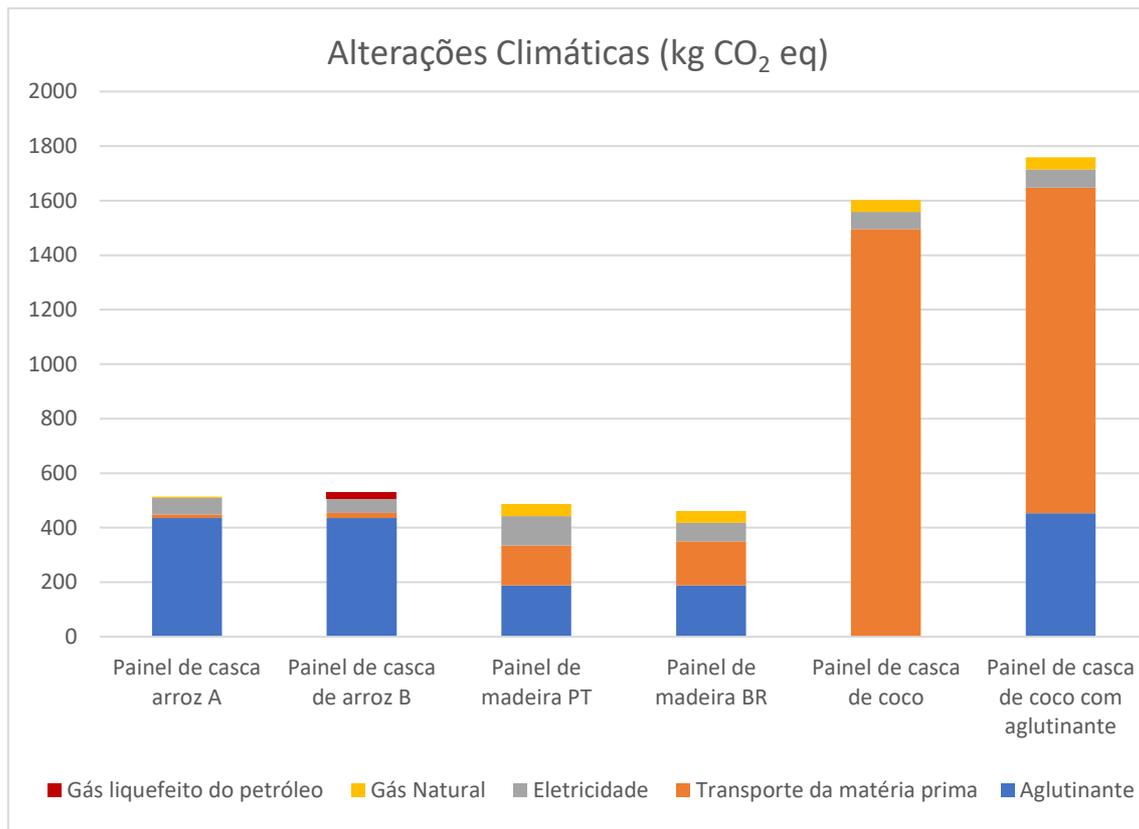
Para o cenário A, a fase de ciclo de vida com maior contribuição para os impactes ambientais da produção do painel de casca de arroz é a produção do aglutinante, contrariamente ao que se verificou à escala laboratorial, cuja contribuição varia entre 27 % (depleção da camada de ozono) e 88 % (uso de recursos fósseis), seguido da eletricidade 9 % (uso de recursos minerais e metais) e 47 % (radiação ionizante). No caso do cenário B a produção do aglutinante também é a fase de ciclo de vida com maior contribuição para os impactes ambientais, variando entre 7 % (depleção da camada de ozono) e 85 % (eutrofização marinha) seguido do gás liquefeito do petróleo, 3 % (eutrofização de água doce) e 76 % (depleção da camada de ozono).

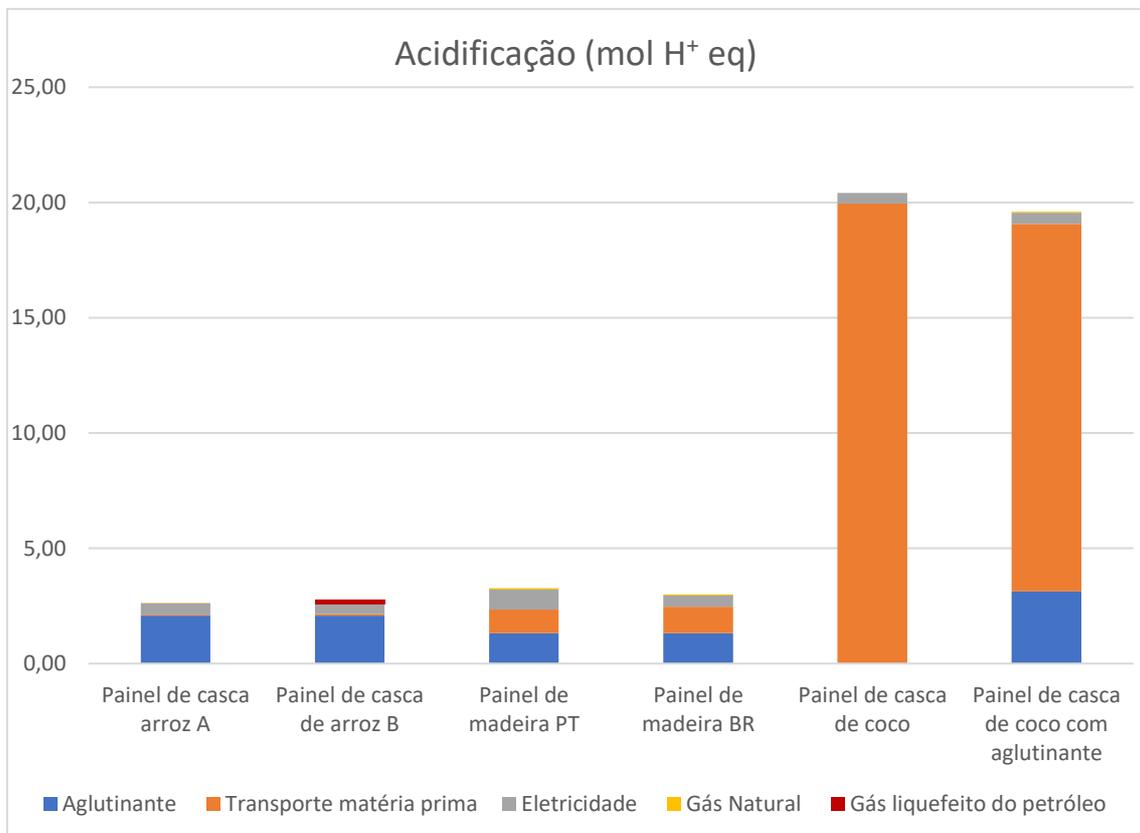
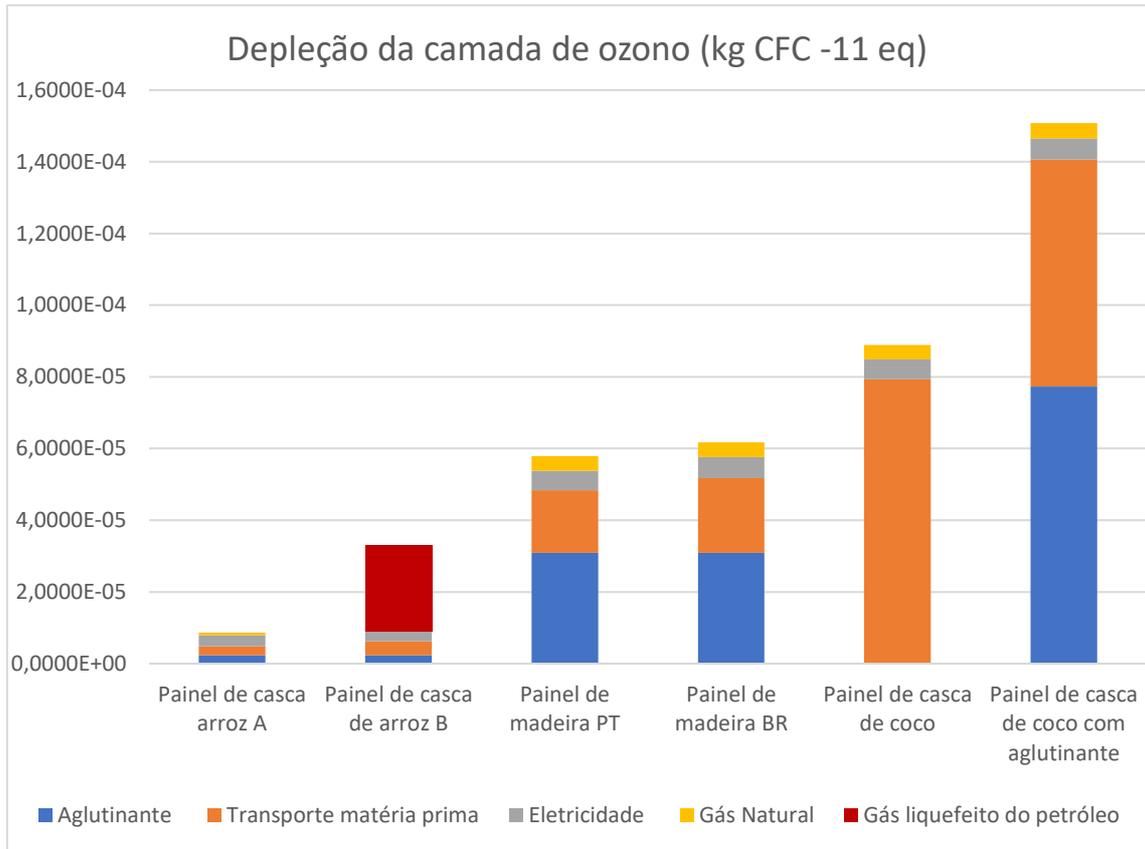
Relativamente ao painel de madeira produzido em Portugal, a fase de ciclo de vida com maior contribuição para os impactes ambientais é a produção do aglutinante, cuja contribuição varia entre 29 % (formação de ozono fotoquímico) e 58 % (utilização de recursos minerais e metais), seguida do transporte, 30 % (alterações climáticas, acidificação e depleção da camada de ozono) e 87 % (utilização de recursos minerais e metais). O mesmo se verifica para o painel produzido no Brasil, cuja contribuição da produção do aglutinante varia entre 0,3 % (radiação ionizante) e 53 % (depleção da camada de ozono), seguida do transporte, 32 % (utilização de recursos fósseis) e 61 % (formação de ozono fotoquímico).

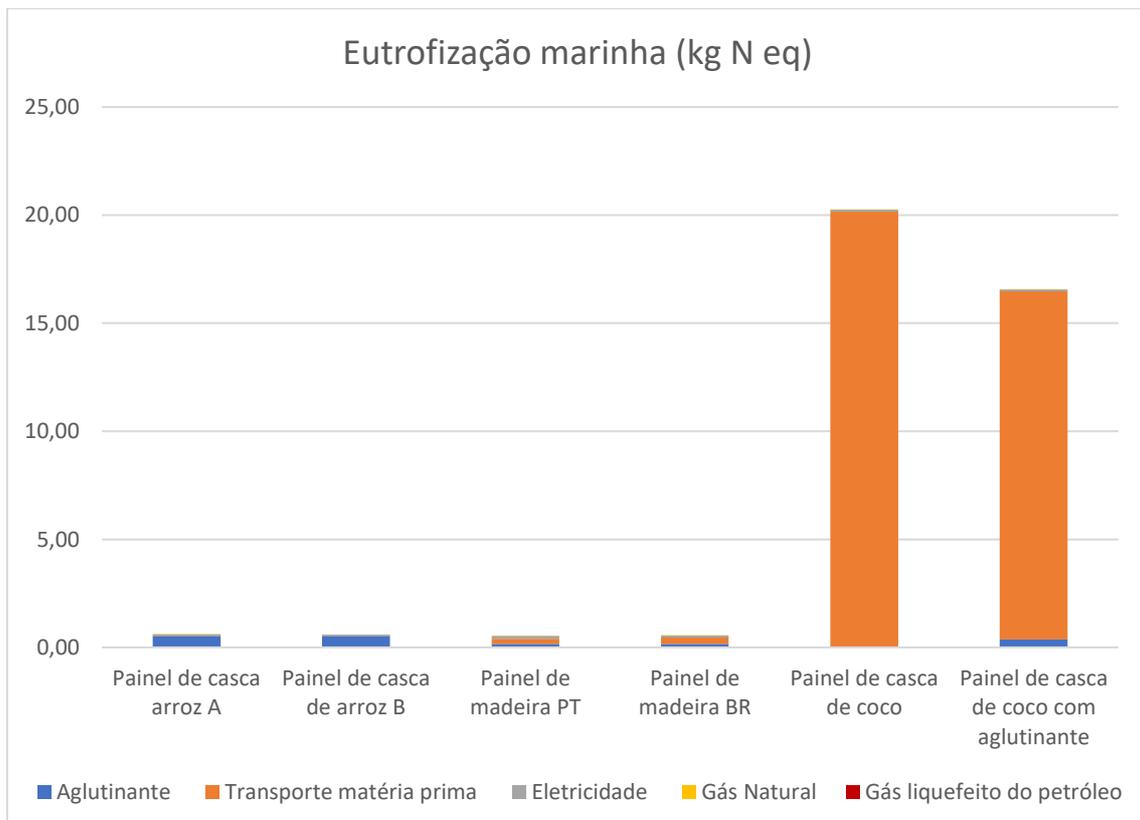
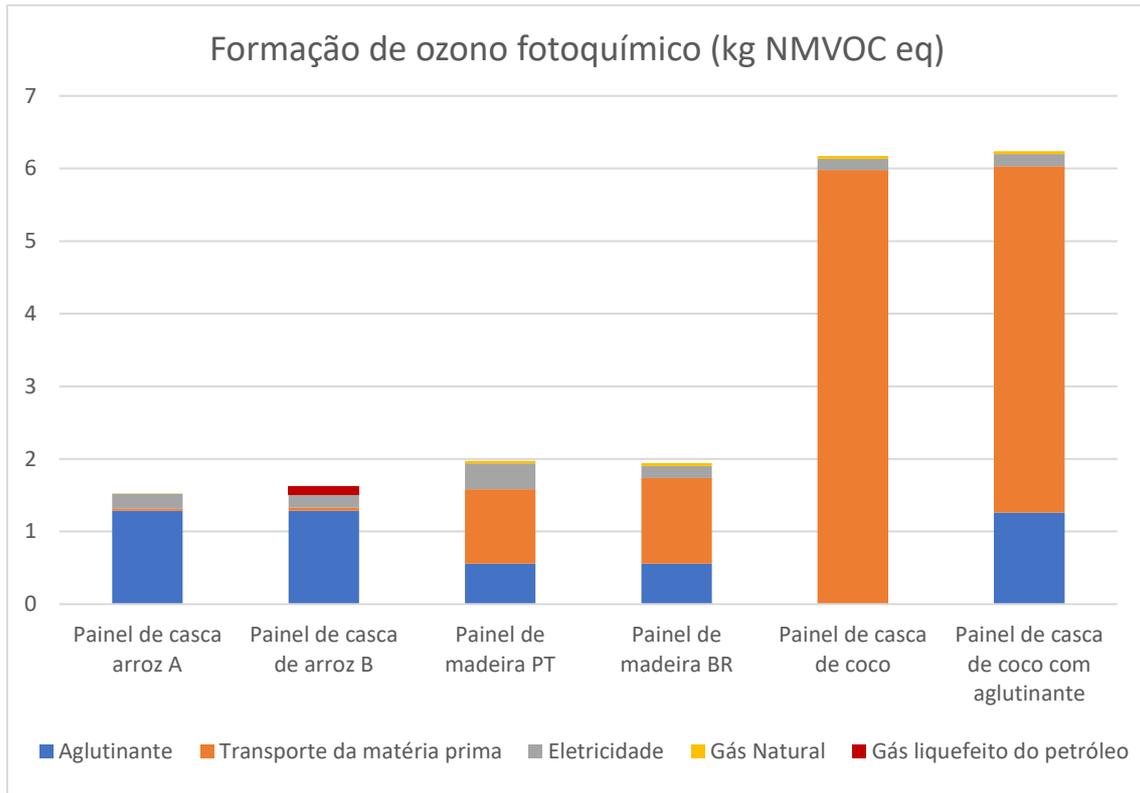
Quanto aos painéis de casca de coco produzidos no Brasil, o transporte é o maior contribuinte para os impactes ambientais da produção do painel. Esta contribuição varia entre 86 % (radiação ionizante) e 100 % (eutrofização marinha) para o painel sem aglutinante, e varia entre 22 % (eutrofização de água doce) e 97 % (eutrofização marinha) para o painel com aglutinante.

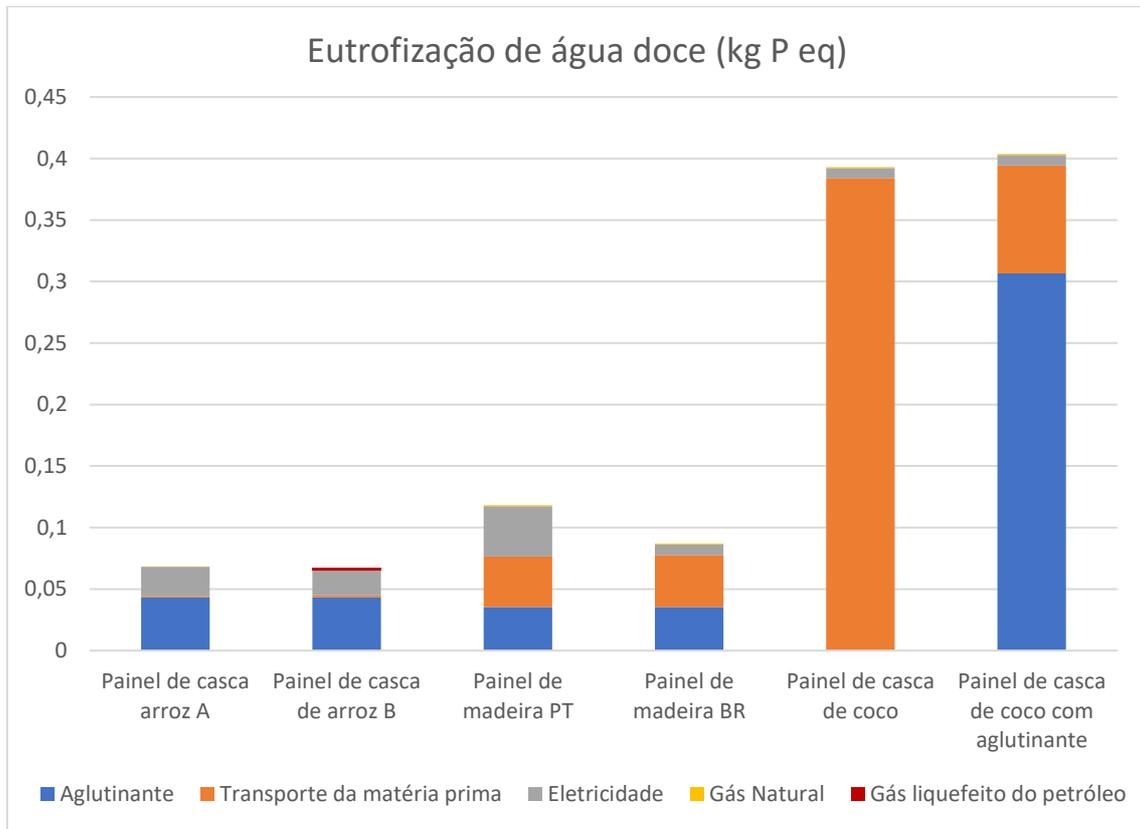
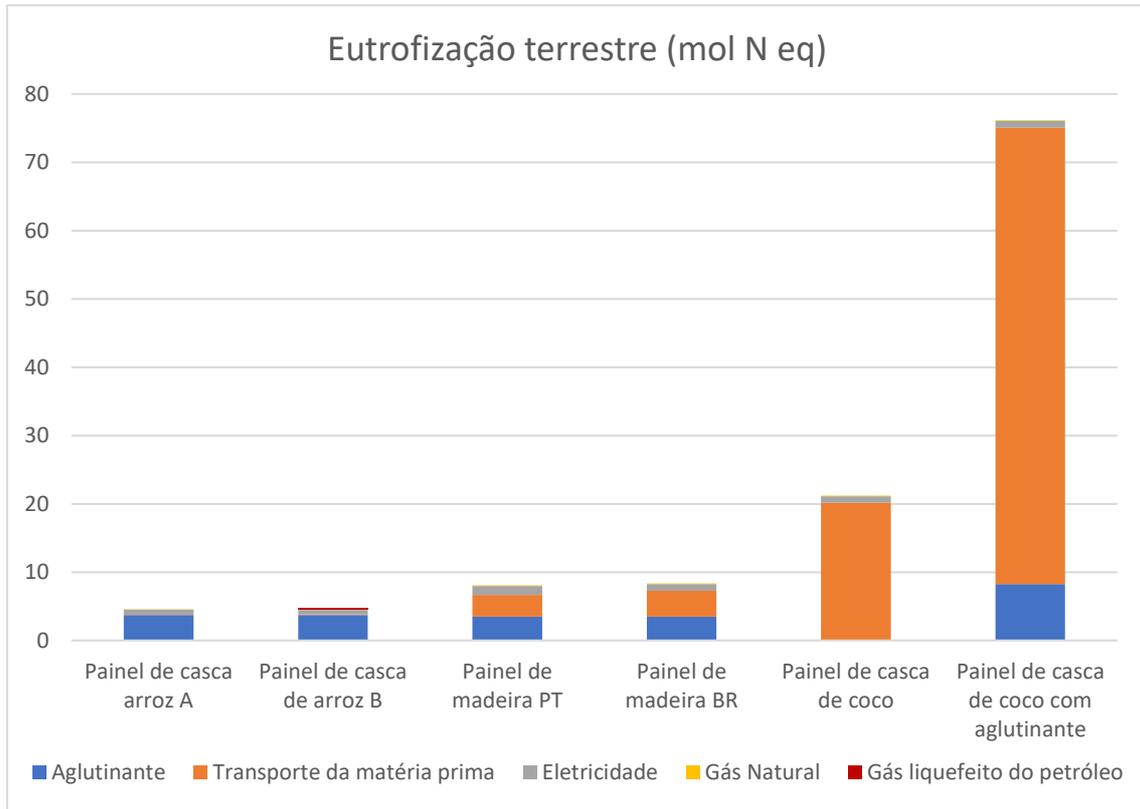
Relativamente ao transporte da matéria prima, as distâncias do transporte da casca de arroz e da madeira para os painéis produzidos em Portugal, são semelhantes, no entanto, os resultados dos impactes apresentam algumas diferenças. Para o painel de casca de arroz do cenário A, existem reduções na ordem de 43 % (acidificação) a 98 % (eutrofização

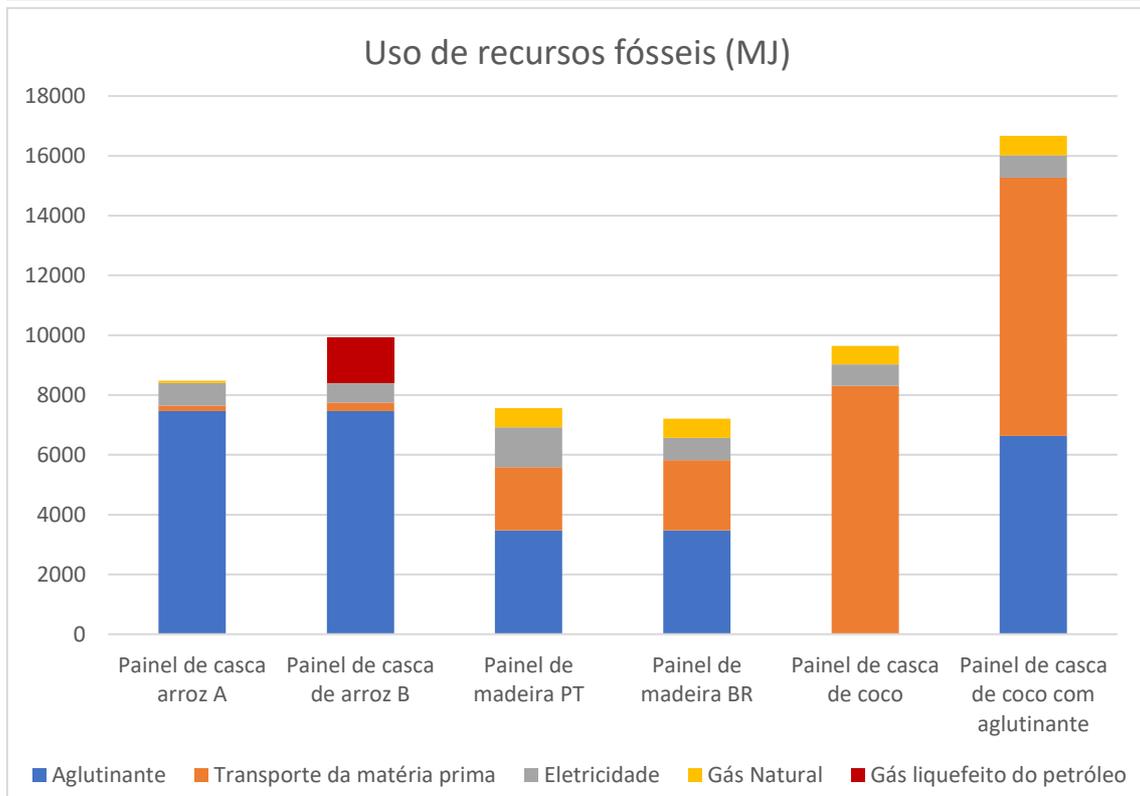
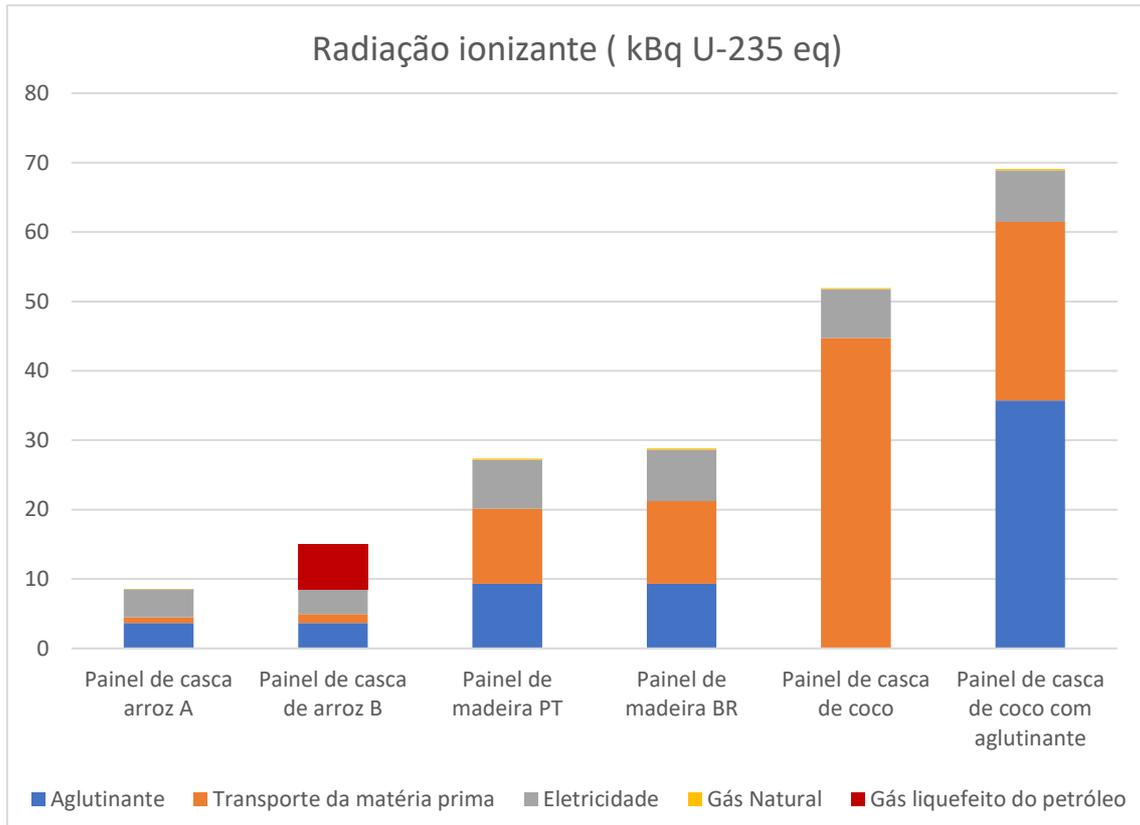
terrestre), quando comparados com a produção do painel madeira em Portugal. Uma justificação possível para esta diferença pode estar no facto de no processo de transformação da madeira em fibra existirem perdas da ordem dos 12 %, sendo por isso necessário transportar uma maior quantidade de matéria-prima por painel, quando comparado com a quantidade de matéria-prima necessária à produção do painel de casca de arroz. Isto amplifica-se ainda mais no caso da produção dos painéis de casca de coco, uma vez que as perdas são na ordem dos 70 %.











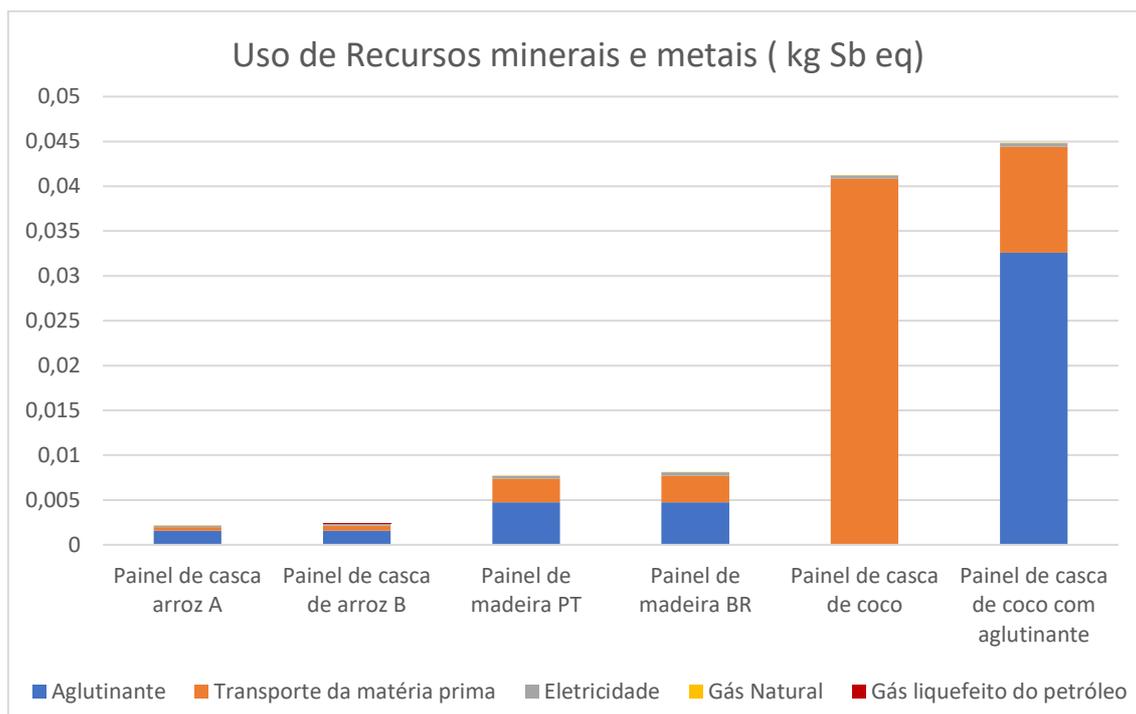


Figura 4.2 Impactes ambientais de CV de 1 m³ de painel de casca de arroz, madeira e casca de coco, com e sem aglutinante, produzidos à escala industrial.

Na Tabela 4.1 encontra-se sistematizada a comparação das contribuições das emissões da produção de 1 m³ de um painel de casca de arroz à escala laboratorial e industrial (cenário A e B). Apresenta-se também o valor da percentagem de variação existente entre os impactes da produção à escala laboratorial e os impactes da produção à escala industrial, onde a representação “+” significa que existiu um aumento de impacte relativamente à escala laboratorial e “-” uma diminuição relativamente à escala laboratorial. A **negrito** encontram-se assinalados os menores valores dos impactes analisados, representando o melhor desempenho para cada categoria de impacte para a escala laboratorial, industrial cenário A e industrial cenário B.

É possível observar que, para todas as categorias, a produção à escala industrial apresenta menos impactes do que a produção à escala laboratorial. Na maioria das categorias de impacte, o painel de casca de arroz no cenário A, apresenta um melhor desempenho comparativamente ao cenário B. A exceção é encontrada na categoria de eutrofização de água doce, mas cuja diferença de impactes é relativamente pequena (diferença inferior a 1 %). Pode concluir-se que o processo de produção no cenário A (eletricidade e gás natural) apresenta melhor potencial de implementação à escala industrial numa perspetiva ambiental.

Tabela 4.1 Contribuições das emissões da produção de painéis de casca de arroz à escala laboratorial e industrial

Categoria de impacto	Unidade	Painel de casca de arroz Escala Laboratorial	Painel de casca de arroz Escala industrial – cenário A	Δ escala laboratorial e escala industrial cenário A	Painel de casca de arroz Escala industrial – cenário B	Δ escala laboratorial e escala industrial cenário B
Aquecimento Global	kg CO ₂ eq	1929,74	414	- 79%	532	- 72%
Formação ozono fotoquímico	kg NMVOC eq	6,21	1,52	- 76%	1,62	- 74%
Acidificação	mol H ⁺ eq	14,24	2,63	- 82%	2,79	- 80%
Depleção da camada de ozono	kg CFC-11 eq	7,78E-05	8,62E-06	- 89%	3,29E-05	- 58%
Eutrofização marinha	kg N eq	2,24	0,6	- 73%	0,62	- 72%
Eutrofização terrestre	mol N eq	21,8	4,54	- 79%	4,76	- 78%
Eutrofização água doce	kg P eq	0,61	0,068	- 89%	0,067	- 89%
Radiação ionizante	kBq U-235 eq	101,42	8,58	- 92%	15	- 85%
Uso de recursos fósseis	MJ	25967,90	8479,36	- 67%	9820,1	- 62%
Uso de recursos minerais e metais	kg Sb eq	0,01	0,002	- 68%	0,002	- 68%

5. CONCLUSÕES

Este capítulo descreve as conclusões da presente dissertação. No primeiro subcapítulo são apresentadas as conclusões relativas ao estudo de avaliação prospetiva do painel de casca de arroz, incluindo a análise de cenários e comparativa com outros painéis. No segundo subcapítulo são descritas as limitações encontradas no decorrer do desenvolvimento da tese e apresentadas recomendações para trabalho futuro.

O principal objetivo consistiu em avaliar o desempenho ambiental de ciclo de vida de um painel de casca de arroz, através da metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) prospetiva e, posteriormente, compará-lo com painéis convencionais de madeira e outros resíduos agroalimentares. Foram desenvolvidos modelos e inventários de ciclo de vida para duas escalas de produção, escala laboratorial e escala industrial, através de um processo de escalonamento. Posteriormente foi efetuada uma avaliação de impacte ambiental de CV e os resultados dos impactes ambientais foram analisados e comparados com outros painéis.

5.1 Avaliação de ciclo de vida

Os resultados de avaliação de ciclo de vida mostraram que o desempenho da produção de painéis de casca de arroz superou o da produção de painéis de madeira e de casca de coco em sete das dez categorias de impacte selecionadas, uma vez que existem menos contribuições para o aumento dos impactes ambientais representados nas categorias de impacte definidas.

Os cenários A e B revelaram resultados semelhantes, permitindo concluir que apesar das pequenas diferenças indicarem que o uso de eletricidade e gás natural apresentam um melhor desempenho ambiental, ambos os cenários apresentam possíveis futuros processos de produção industrial para um painel de casca de arroz. O ponto crítico identificado na escala laboratorial foi o uso de eletricidade. À escala industrial o ponto crítico identificado foi o uso do aglutinante, tornando vantajoso o estudo de possíveis alternativas ao seu uso.

Relativamente aos painéis de casca de coco, tanto à escala laboratorial como industrial, ambos apresentaram impactes ambientais muito superiores ao do painel de casca de arroz, e superiores aos painéis de madeira. Já os painéis de madeira, para quase todas as categorias apresentaram valores próximos aos do painel de casca de arroz, no entanto, este último conseguiu ter um melhor desempenho em sete das dez categorias.

Assim sendo, tendo em conta todas os pressupostos assumidos e a fronteira do sistema, a produção do painel de casca de arroz apresenta potencial para um bom desempenho ambiental numa futura produção à escala industrial, uma vez que os impactes ambientais deste são inferiores aos impactes dos painéis convencionais de madeira bem como de painéis alternativos de outros resíduos agroindustriais como a casca de coco que também se encontram em fases iniciais de desenvolvimento.

5.2 Limitações e investigações futuras

Existiram várias limitações no decorrer desta investigação, uma vez que o tema desta tese nunca foi abordado na literatura existindo muito pouca informação. O produto que foi analisado encontra-se num estado muito inicial de desenvolvimento, em que apenas estão disponíveis alguns dados de produção baseados em muito poucas experiências à escala laboratorial disponíveis na literatura. Assim, todos os processos foram modelados à escala industrial através da aplicação de um processo simplificado de escalonamento. As proporções de quantidade de materiais mantiveram-se as mesmas no modelo à escala industrial e os métodos de produção foram todos adaptados com base no processo de fabrico de um painel de madeira. A principal limitação foi relativa aos consumos energéticos de prensagem do painel, que foram atribuídos com base na produção de outro tipo de painel, em função da massa do painel de casca de arroz.

Para investigações futuras, primeiramente deveria ser melhorada a qualidade dos dados laboratoriais, através da medição e quantificação das necessidades energéticas para prensagem em laboratório e posteriormente melhorar a qualidade dos dados à escala industrial. Isto poderia ser possível com a aplicação de um método de escalonamento de detalhe e complexidade superior. Adicionalmente, também seria de interesse estender as fronteiras do sistema à fase de uso e final de vida e avaliar alternativas para o aglutinante com menores impactes ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abaide, Ederson R., Marcus v. Tres, Giovani L. Zobot, and Marcio A. Mazutti. 2019. "Reasons for Processing of Rice Coproducts: Reality and Expectations." *Biomass and Bioenergy*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.032>.
- António, Julieta, António Tadeu, Beatriz Marques, João A.S. Almeida, and Vasco Pinto. 2018. "Application of Rice Husk in the Development of New Composite Boards." *Construction and Building Materials* 176 (July): 432–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.028>.
- Arvidsson, Rickard, Duncan Kushnir, Björn A. Sandén, and Sverker Molander. 2014. "Prospective Life Cycle Assessment of Graphene Production by Ultrasonication and Chemical Reduction." *Environmental Science and Technology* 48 (8): 4529–36. <https://doi.org/10.1021/es405338k>.
- Brusseau, M.L. 2019. "Sustainable Development and Other Solutions to Pollution and Global Change." In *Environmental and Pollution Science*, 585–603. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814719-1.00032-x>.
- Buratti, C., E. Belloni, E. Lascaro, F. Merli, and P. Ricciardi. 2018. "Rice Husk Panels for Building Applications: Thermal, Acoustic and Environmental Characterization and Comparison with Other Innovative Recycled Waste Materials." *Construction and Building Materials* 171 (May): 338–49. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.089>.
- Cucurachi, Stefano, Coen van der Giesen, and Jeroen Guinée. 2018. "Ex-Ante LCA of Emerging Technologies." In *Procedia CIRP*, 69:463–68. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.005>.
- Fávaro, Silvia Luciana, Milena Savioli Lopes, Alberto Gonçalves Vieira de Carvalho Neto, Ricardo Rogério de Santana, and Eduardo Radovanovic. 2010. "Chemical, Morphological, and Mechanical Analysis of Rice Husk/Post-Consumer Polyethylene Composites." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41 (1): 154–60. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.09.021>.
- Ferro, Fabiane Salles, Diogo Aparecido Lopes Silva, Francisco Antonio Rocco Lahr, Mateus Argenton, and Sara González-García. 2018. "Environmental Aspects of Oriented Strand Boards Production. A Brazilian Case Study." *Journal of Cleaner Production* 183 (May): 710–19. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.174>.
- Freire, Ana Lúcia Feitoza, Celso Pires de Araújo Júnior, Morsyleide de Freitas Rosa, Maria Cléa Brito de Figueirêdo, and José Adolfo de Almeida Neto. 2017. "Environmental Assessment of Bioproducts in Development Stage: The Case of Fiberboards Made from Coconut Residues." *Journal of Cleaner Production* 153 (June): 230–41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.100>.
- Givi, Alireza Naji, Suraya Abdul Rashid, Farah Nora A. Aziz, and Mohamad Amran Mohd Salleh. 2010. "Assessment of the Effects of Rice Husk Ash Particle Size on Strength, Water Permeability and Workability of Binary Blended Concrete." *Construction and Building Materials* 24 (11): 2145–50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.045>.
- Kouchaki-Penchah, Hamed, Mohammad Sharifi, Hossein Mousazadeh, Hamid Zarea-Hosseinabadi, and Ashkan Nabavi-Pelesaraei. 2016. "Gate to Gate Life Cycle

- Assessment of Flat Pressed Particleboard Production in Islamic Republic of Iran.” *Journal of Cleaner Production* 112 (January): 343–50.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.056>.
- Marques, Beatriz, António Tadeu, Julieta António, João Almeida, and Jorge de Brito. 2020. “Mechanical, Thermal and Acoustic Behaviour of Polymer-Based Composite Materials Produced with Rice Husk and Expanded Cork by-Products.” *Construction and Building Materials* 239 (April).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117851>.
- Piekarski, Cassiano Moro, Antonio Carlos de Francisco, Leila Mendes da Luz, João Luiz Kovaleski, and Diogo Aparecido Lopes Silva. 2017. “Life Cycle Assessment of Medium-Density Fiberboard (MDF) Manufacturing Process in Brazil.” *Science of the Total Environment* 575 (January): 103–11.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.007>.
- Prusty, Jnyanendra Kumar, Sanjaya Kumar Patro, and S. S. Basarkar. 2016. “Concrete Using Agro-Waste as Fine Aggregate for Sustainable Built Environment – A Review.” *International Journal of Sustainable Built Environment*. Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.06.003>.
- Ramos, Ana, Ana Briga-Sá, Sandra Pereira, Mariana Correia, Jorge Pinto, Isabel Bentes, and Carlos A. Teixeira. 2021. “Thermal Performance and Life Cycle Assessment of Corn Cob Particleboards.” *Journal of Building Engineering* 44 (December). <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102998>.
- Santos, Maria Fernanda N. dos, Rosane Ap G. Battistelle, Barbara Stolte Bezerra, and Humberto S.A. Varum. 2014. “Comparative Study of the Life Cycle Assessment of Particleboards Made of Residues from Sugarcane Bagasse (*Saccharum Spp.*) and Pine Wood Shavings (*Pinus Elliottii*).” *Journal of Cleaner Production* 64 (February): 345–55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.039>.
- Shen, Jianfeng, Shuguang Zhu, Xinzhi Liu, Houlei Zhang, and Junjie Tan. 2012. “Measurement of Heating Value of Rice Husk by Using Oxygen Bomb Calorimeter with Benzoic Acid as Combustion Adjuvant.” *Energy Procedia* 17: 208–13. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.085>.
- Silva, Diogo Aparecido Lopes, Francisco Antonio Rocco Lahr, Rita Pinheiro Garcia, Fausto Miguel Cereja Seixas Freire, and Aldo Roberto Ometto. 2013. “Life Cycle Assessment of Medium Density Particleboard (MDP) Produced in Brazil.” *International Journal of Life Cycle Assessment* 18 (7): 1404–11.
<https://doi.org/10.1007/s11367-013-0583-3>.
- Thonemann, Nils, Anna Schulte, and Daniel Maga. 2020. “How to Conduct Prospective Life Cycle Assessment for Emerging Technologies? A Systematic Review and Methodological Guidance.” *Sustainability (Switzerland)*. MDPI.
<https://doi.org/10.3390/su12031192>.
- Tuan, Nguyen van, Guang Ye, Klaas van Breugel, Alex L.A. Fraaij, and Danh Dai Bui. 2011. “The Study of Using Rice Husk Ash to Produce Ultra High Performance Concrete.” *Construction and Building Materials* 25 (4): 2030–35.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.046>.
- Uemura Silva, Vitor, Maria Fátima Nascimento, Pablo Resende Oliveira, Tulio Hallak Panzera, Marília Oliveira Rezende, Diogo Aparecido Lopes Silva, Vinicius Borges de Moura Aquino, Francisco Antonio Rocco Lahr, and André Luis Christoforo. 2021. “Circular vs. Linear Economy of Building Materials: A Case Study for Particleboards Made of Recycled Wood and Biopolymer vs. Conventional

- Particleboards.” *Construction and Building Materials* 285 (May).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122906>.
- Villares, Marco, Arda İşıldar, Coen van der Giesen, and Jeroen Guinée. 2017. “Does Ex Ante Application Enhance the Usefulness of LCA? A Case Study on an Emerging Technology for Metal Recovery from e-Waste.” *International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (10): 1618–33. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1270-6>.

ANEXOS

A1. Tabela de propriedades de painéis que incorporam casca de arroz

Função	Matéria Prima	Tipo/nome	Dimensão amostra	Prensa (T °C)	Prensa (kPa)	Espessura final	Densidade
		poly(butylene adipate-co-terephthalate)/poly(lactic acid) (PBAT/PLA)	40 x 40 mm	180	<=1000		
Isolamento térmico	Casca de Arroz			175	<= 5000	2 cm	378 ± 13 kg/m ³
Painel de partículas	Casca de Arroz	soybean protein concentrate (SPC)	30x30 cm	140	2900	0.55 cm	0.80 ± 0.05 g/cm ³
Incorporação na construção de paredes	Casca de Arroz	polímero de poliuretano à base de TDI	1000x100 mm	180 - 200	n.d	30 mm	223 ± 11 kg/m ³ 330 ± 18 kg/m ³ 390 ± 18 kg/m ³
Painel de partículas	Casca de Arroz	soybean protein concentrate (SPC)	30x30cm	140	2900	0,50cm	812+/- 12 kg/m ³
Painel de partículas	Casca de arroz (0,75kg)	Top bond (starch wood glue)	300x300 mm	n.d	n.d	15 mm	711,11 kg/m ³
Painel de partículas	Casca de arroz	ureaformaldehyde adhesive	50x50 cm	180	300	0,95cm	0,65 g/cm ³
Isolamento	Casca de arroz	cold-water-based polyurethane	300x300 mm	-	-	41 mm	170 kg/m ³
isolamento	Casca de arroz	-	100x100x172,3 cm	-	-	-	-

A2. Fluxogramas

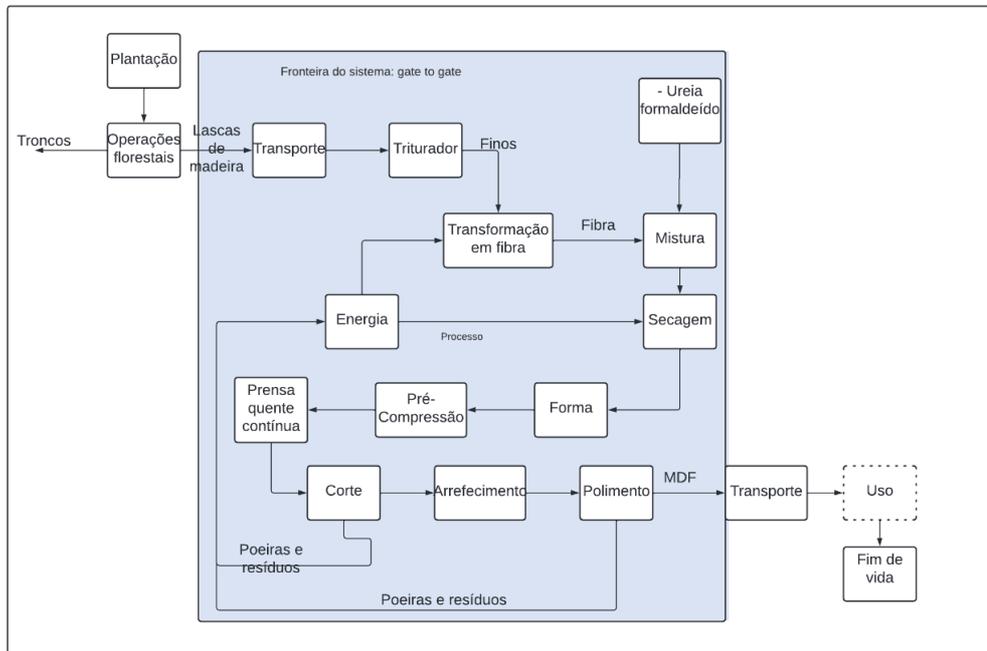


Figura 1. Fluxograma do ciclo de vida do painel de madeira

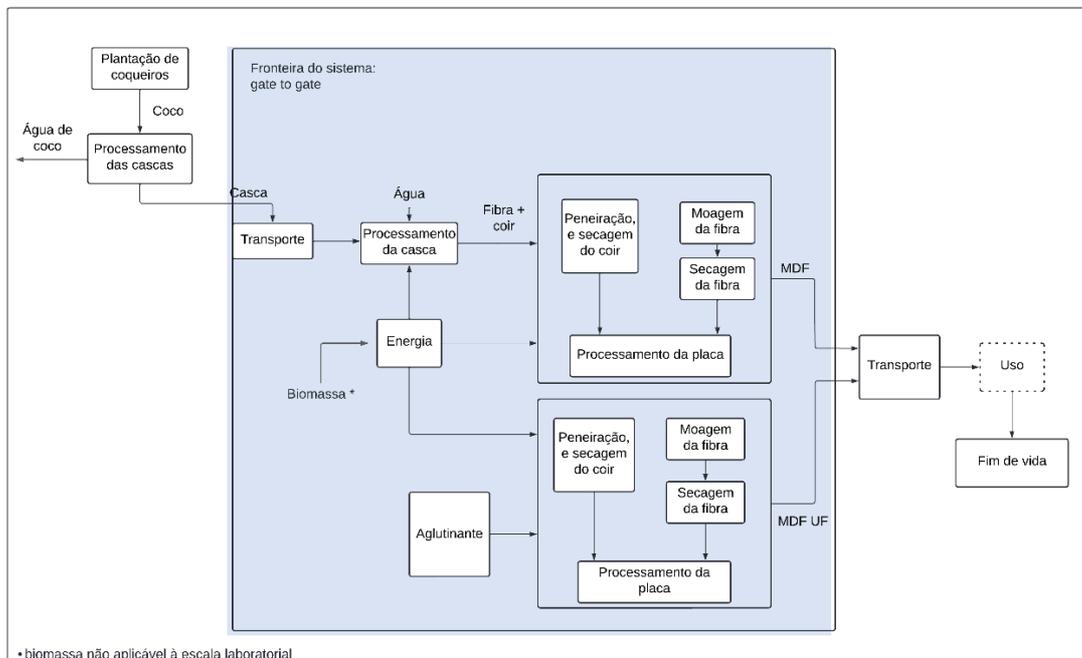


Figura 2. Fluxograma do ciclo de vida dos painéis de casca de de coco