

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

**FABIANE SALLES FERRO**

**Painéis de partículas orientadas (OSB) com insumos alternativos: viabilidade técnica e proposta de melhoria de desempenho ambiental**

**São Carlos  
2017**



**FABIANE SALLES FERRO**

**Painéis de partículas orientadas (OSB) com insumos alternativos: viabilidade técnica e proposta de melhoria de desempenho ambiental**

Versão Corrigida  
Original na Unidade

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Orientador (a): Francisco Antonio Rocco Lahr

**São Carlos  
2017**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F118p Ferro, Fabiane Salles  
Painéis de partículas orientadas (OSB) com insumos alternativos: viabilidade técnica e proposta de melhoria de desempenho ambiental / Fabiane Salles Ferro; orientador Francisco Antonio Rocco Lahr. São Carlos, 2017.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e Área de Concentração em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. Painéis compósitos à base de madeira . 2. Avaliação do ciclo de vida. 3. Oriented Strand Board . 4. Impacto ambiental. 5. Madeira de desbaste. I. Título.

292  
7

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **FABIANE SALLES FERRO**.

Título da tese: "Painéis de partículas orientadas (OSB) com insumos alternativos: viabilidade técnica e proposta de melhoria de desempenho ambiental".

Data da defesa: 20/10/2017.

### Comissão Julgadora:

### Resultado:

Prof. Titular **Francisco Antonio Rocco Lahr**  
**(Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Profa. Dra. **Rosane Aparecida Gomes Battistelle**  
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Bauru)

APROVADA

Prof. Associado **Aldo Roberto Ometto**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Dr. **Luciano Donizeti Varanda**  
(Pós-Doutorando/CAPES)

APROVADA

Profa. Dra. **Cristiane Inacio de Campos**  
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Itapeva)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais:

Prof. Titular **Antonio José Felix de Carvalho**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

*Aos meus amados pais, Silvio e Vera, e à minha querida irmã Flavia por todo carinho, incentivo e  
confiança, com todo amor  
Dedico.*



## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr, por todo ensinamento intelectual, científico e pessoal, os quais foram imensamente importantes para meu crescimento profissional e desenvolvimento deste trabalho. Seu amor pela profissão, atenção e carinho com seus orientados me incentivam e me inspiram a seguir o caminho da docência.

À professora Dr. Sara Garcia-González pela orientação de parte deste trabalho e pela receptividade na Universidad de Santiago de Compostela, em Santiago de Compostela.

Ao professor Dr. Diogo Aparecido Lopes Silva por toda orientação e amizade.

Ao doutorando Fábio do departamento de Engenharia Elétrica da EESC (Escola de Engenharia de São Carlos) pelo auxílio nas medições da energia elétrica consumida em laboratório.

À empresa LP Brasil, pelas informações que contribuíram para o desenvolvimento deste estudo e principalmente ao Matheus Argenton pela paciência e por toda ajuda para conclusão este trabalho.

Ao professor Dr. André Luis Christoforo pela amizade e grande auxílio na análise estatística.

Aos meus amigos do LaMEM: Amós, Luciano, Maria Fátima, Raquel, Diego, Marcos e especialmente Tiago, Laurenn (amiga querida) e Felipe, pela amizade, momentos de descontração e trabalhos. Melhor equipe de trabalho, sentirei saudades.

Aos funcionários do LaMEM, Arnaldo, Jaime, Roberto, Bragato, Samuel, Taninha, pela amizade e contribuições com meus estudos. Em especial ao Cido, pela grande dedicação na execução deste e de outros trabalhos, e ao Silvio (meu amado pai), que foi fundamental com todo seu amor, apoio, incentivo, carinho, confiança e dedicação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos: Marianne Rodrigue Fernandes e Ney Santos, pela amizade, carinho, viagens e canãs. Minha família nos 6 meses de Espanha.

Aos meus colegas do Biogroup e principalmente à Lucia, Isa, Paula pela ótima receptividade e ajuda para o desenvolvimento da ACV.

À Capes pelas bolsas (doutorado e PDSE) concedidas.

Enfim, a todos que de uma forma ou outra estiveram envolvidos na realização deste trabalho e na participação desta etapa da minha vida, os meus sinceros agradecimentos.

Muito obrigada a todos!



## RESUMO

FERRO, F. S. **Painéis de partículas orientadas (OSB) com insumos alternativos: viabilidade técnica e proposta de melhoria de desempenho ambiental**. 2017. 178 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

A utilização de painéis de madeira industrializada vem crescendo no Brasil e um dos destaques é o painel *Oriented Strand Board* (OSB). Aliadas ao crescimento econômico deste painel estão também as preocupações ambientais da sociedade e das indústrias relacionadas aos produtos que consomem e que produzem, respectivamente. A avaliação do ciclo de vida se constitui em importante ferramenta para a análise dos impactos ambientais associados a um produto, pois avalia de forma holística todo o seu ciclo de vida. O objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade da utilização de insumos alternativos, como partículas de madeira da espécie de *Pinus* provenientes de desbaste e resina poliuretana à base de óleo de mamona (PU-mamona), na fabricação de OSB. Foram testados três proporções entre os componentes polioliol e pré-polímero da resina, sendo 1:1 (C1), 1,25:0,75 (C2) e 1,5:0,5 (C3), respectivamente. Além disso, a fim de verificar o desempenho ambiental de tais insumos, utilizou-se a ACV para identificar e quantificar os principais impactos ambientais potenciais relacionados ao ciclo de vida *cradle-to-gate* dos OSB fabricados no Brasil, em escala laboratorial e industrial. A caracterização físico-mecânica do OSB foi realizada com base no documento normativo europeu EN 300 (2006) e normas relacionadas, devido à ausência de normas brasileiras para o assunto em questão. Para isso foram realizados ensaios os ensaios físicos de densidade, teor de umidade, inchamento em espessura e absorção de água após 2 e 24h de imersão em água, e os ensaios mecânicos para determinação do módulo de elasticidade e módulo de ruptura na flexão estática no sentido paralelo e perpendicular à orientação das partículas e tração perpendicular às faces. O desenvolvimento da ACV foi baseado nos documentos normativos ABNT NBR ISO 14000 e 14044. A análise de variância (ANOVA) de Kruskal-Wallis, ao nível de 5% de significância foi utilizada para investigar a influência dos teores de polioliol (1; 1,25; 1,50) nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis fabricados, e o teste de comparações de Student-Newman-Keuls foi utilizado para o agrupamento dos respectivos níveis. Os resultados mostraram que é viável a utilização de tais insumos na fabricação de OSB, proporcionando aos painéis resultados compatíveis com a norma EN 300 (2006) para aplicação em diversos setores da construção civil. Além disso, a condição experimental no qual foi utilizado a proporção 1,25:0,75 se sobressaiu em relação as outras por utilizar maior quantidade do componente polioliol, de origem renovável, e apresentar resultados compatíveis com a norma citada. Com relação à Avaliação do ciclo de vida, foi encontrado que

os principais “*hotspots*” para a fabricação do OSB em escala industrial são a produção dos químicos, principalmente o inseticida piretróide, a geração de calor na planta industrial para secagem das partículas e aquecimento do óleo da prensa, e a produção da resina MDI (Metil difenil diisocianato). O principal responsável pelos impactos ambientais na produção do OSB em escala laboratorial em 80% das categorias analisadas é a produção da resina PU-mamona. Ficou constatado que o uso de tal resina em elevadas proporções (12%), como utilizada na fabricação dos painéis em laboratório, pode proporcionar, para determinadas categorias, maiores impactos quando comparados com a resina MDI.

Palavras-chave: Painéis compósitos à base de madeira. Avaliação do ciclo de vida. Oriented Strand Board. Impacto ambiental. Madeira de desbaste.

## ABSTRACT

Ferro, F. S. **Oriented strand board (OSB) with alternative inputs: technical feasibility and proposed of environmental performance improvement**. 2017. 178 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

The use of industrialized wood panels has been growing in Brazil and one of the highlights is the Oriented Strand Board (OSB). Allied to the economic growth of this panel are also the environmental concerns of society and the industries related to the products that consume and produce, respectively. The life cycle assessment (LCA) is an important tool for the analysis of the environmental impacts associated with a product, since it assesses in a holistic way its whole life cycle. The aim of this work was to evaluate the feasibility of the use of alternative inputs, such as Pine species wood particles from thinning and castor oil based polyurethane resin (PU-castor), in the OSB manufacture. It were tested three ratios between polyol and prepolymer components of the resin, being 1: 1, 1.25: 0.75 and 1.5: 0.5, respectively. In addition, in order to verify the environmental performance of the inputs, the LCA was used to identify and quantify the environmental impacts potential related to a cradle-to-gate life cycle of OSB manufactured in Brazil at laboratory and industrial scale. The physical-mechanical characterization of the OSB was carried out based on the European normative document EN 300 (2006) and related norms, due to the absence of Brazilian norms for the subject in question. For this, physical tests such as density, moisture content, thickness swelling and water absorption after 2 and 24h of water immersion were performed, and mechanical tests such as modulus of elasticity and modulus of rupture in the static bending in parallel direction and perpendicular to the particles orientation and internal bonding were performed. The development of the LCA was based on the normative documents ABNT NBR ISO 14000 and 14044 (2009). Kruskal-Wallis analysis of variance (ANOVA) at 5% significance level was used to investigate the polyol and prepolymer contents (1; 1,25; 1,50) influence on physical and mechanical properties of the panels, the Student-Newman-Keuls comparisons test was used to group the respective levels. The results showed that the use of such inputs is feasible in the manufacture of OSB, providing the panels results with compatible with EN 300 (2006) standard for application in several sectors of civil construction. In addition, the experimental condition in which the 1.25:0.75 ratio was used stood out in relation to the others because it used a greater amount of the polyol component, which is a renewable component, and presented results compatible with the cited standard. In addition, it has been found that the main "hotspots" for manufacturing OSB on an industrial scale are the production of chemicals, mainly pyrethroid insecticide, heat generation in the industrial plant for particle drying and press oil heating, and production of the

MDI resin (Methyl diphenyl diisocyanate). The main responsible for the environmental impacts in the OSB production in laboratory scale, in 80% of the analyzed categories, was the production of PU castor resin. It was found that the use of such resin in high proportions (12%), as used in the manufacture of the panels in the laboratory, can provide, for certain categories, greater impacts when compared with the MDI resin.

**Keywords:** Composite wood panels. Life cycle assessment. Oriented Strand Board. Environmental impact. Thinning wood.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Produtividade florestal (m <sup>3</sup> /há.ano) no Brasil <i>versus</i> outros importantes produtores florestais mundiais .....	27
Figura 2- Áreas e distribuição dos plantios de <i>Pinus</i> pelo Brasil .....	29
Figura 3- Posicionamento das partículas nas camadas internas do OSB.....	34
Figura 4- Aplicações do OSB .....	35
Figura 5 - Etapas de produção do OSB .....	36
Figura 6- Estágios do ciclo de vida de um produto .....	48
Figura 7- Fases de uma ACV .....	50
Figura 8- Procedimento simplificado para análise de inventário.....	52
Figura 9- Elementos mandatórios e opcionais da fase de AICV .....	54
Figura 10- Evolução da ACV no Brasil .....	56
Figura 11- Insumos utilizados na fabricação do OSB.....	64
Figura 12- Orientador de partículas para fabricação de OSB .....	67
Figura 13- Etapas do processo produtivo dos OSB. ....	68
Figura 14- Esquema de retirada dos corpos de prova de um painel .....	69
Figura 15- Ensaio de inchamento em espessura e absorção de água. ....	72
Figura 16- Ensaio de flexão estática .....	73
Figura 17- Ensaio de tração perpendicular às faces.....	75
Figura 18 - Valores médios, intervalos confiança e coeficientes de variação das propriedades físicas .....	90
Figura 19- Valores médios, intervalos de confiança e coeficientes de variação das propriedades módulo de elasticidade (a) e de resistência (b) na flexão estática na direção paralela à orientação das partículas.....	94
Figura 20- Valores médios, intervalos de confiança e coeficientes de variação das propriedades módulo de elasticidade (a) e de resistência (b) na flexão estática na direção paralela à orientação das partículas.....	97
Figura 21- Valores médios, intervalos confiança e coeficientes de variação da resistência à tração perpendicular às faces .....	100
Figura 22 – Máquinas utilizadas na colheita florestal. ....	107
Figura 23- Fronteiras do sistema do ciclo de vida da produção OSB, em escala industrial, (perspectiva <i>cradle-to-gate</i> ).....	109
Figura 25- Fronteiras do sistema do ciclo de vida da produção OSB, em escala laboratorial,	

(perspectiva <i>cradle-to-gate</i> ).....	111
Figura 26- Medição de energia da produção do OSB em laboratório.....	116
Figura 27 - Contribuições para o perfil ambiental correspondente ao sistema brasileiro de produção de madeira de <i>Pinus</i> , considerando as atuais práticas florestais .....	124
Figura 27 - Mudanças climáticas- subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP <sub>i</sub> ).....	129
Figura 28 - Mudanças climáticas- subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP <sub>l</sub> ) .....	130
Figura 29 – Depleção da camada de ozônio- subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP <sub>i</sub> ).....	131
Figura 30 – Depleção da camada de ozônio- subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP <sub>l</sub> ).....	132
Figura 31 - Acidificação terrestre - subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP <sub>i</sub> ).....	133
Figura 32 - Acidificação terrestre - subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP <sub>l</sub> ).....	134
Figura 33- Eutrofização de água doce – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP <sub>i</sub> ).....	135
Figura 34 - Eutrofização de água doce - subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP <sub>l</sub> ) .....	136
Figura 35 - Eutrofização marinha – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP <sub>i</sub> ).....	137
Figura 36 - Eutrofização marinha – subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP <sub>l</sub> ) .....	138
Figura 37 - Toxicidade Humana – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP <sub>i</sub> ).....	139
Figura 38 - Toxicidade Humana – subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP <sub>l</sub> ) .....	140
Figura 40 – Formação de oxidantes fotoquímicos – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP <sub>i</sub> ) .....	141
Figura 40 - Formação de oxidantes fotoquímicos – subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP <sub>l</sub> ).....	142
Figura 41 - Ecotoxicidade terrestre – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP <sub>i</sub> ).....	143

Figura 42 - Ecotoxicidade terrestre – subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP <sub>i</sub> ) .....	144
Figura 43 - Ecotoxicidade de água doce – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP <sub>i</sub> ).....	145
Figura 44 - Ecotoxicidade de água doce – subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP <sub>i</sub> ).....	146
Figura 45 - Depleção fóssil – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP <sub>i</sub> ).....	147
Figura 46 - Depleção fóssil – subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP <sub>i</sub> ) .....	148
Figura 47 - Avaliação comparativa do impacto ambiental de três cenários para aplicação de inseticida na produção do OSB “ <i>home</i> ” .....	153



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Condições experimentais .....	64
Tabela 2- Quantidade de corpos de prova e normas utilizadas para ensaios de caracterização..	70
Tabela 3- Métodos de AICV utilizados em estudos para compósitos à base de madeira e produção florestal .....	81
Tabela 4 - Valores médios para as propriedades teor de umidade e densidade dos painéis.....	89
Tabela 5- Resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações de Student-Newman-Keuls sobre as propriedades físicas.....	92
Tabela 6- Resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações de Student-Newman-Keuls sobre as propriedades MOE <sub>pa</sub> e MOR <sub>pa</sub> .....	96
Tabela 7 - Resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações de Student-Newman-Keuls sobre as propriedades MOE <sub>pe</sub> e MOR <sub>pe</sub> .....	99
Tabela 8- Resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações de Student-Newman-Keuls sobre a propriedade adesão interna.....	102
Tabela 9- Distâncias de transporte para a produção de OSB em escala industrial .....	114
Tabela 10- Distâncias de transporte para a produção de OSB em escala laboratorial.....	116
Tabela 11- Dados de inventário, correspondentes à cultura de <i>Pinus</i> , a fim de produzir 1m <sup>3</sup> de tipo OSB “ <i>home</i> ” .....	120
Tabela 12- Dados de inventário global (perspectiva <i>gate-to-gate</i> ) por unidade funcional (1 m <sup>3</sup> de OSB tipo <i>home</i> ) correspondente ao subsistema de operação de produção de painel para escala industrial .....	121
Tabela 13- Impactos ambientais potenciais para produção da madeira do gênero <i>Pinus</i> para 1 m <sup>3</sup> de OSB.....	123
Tabela 14 - Impactos ambientais potenciais do gênero <i>Pinus</i> sem a utilização de fertilizantes nas práticas silviculturais .....	126
Tabela 15 - Impactos ambientais potenciais para produção de 1 m <sup>3</sup> de OSB em escala laboratorial e industrial.....	127
Tabela 16 - <i>Hotspots</i> da produção de OSB nas escalas laboratorial e industrial .....	149



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	23
1.1 Objetivos .....	25
1.1.1 Objetivo geral .....	25
1.1.2 Objetivos específicos .....	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	27
2.1. Recursos florestais no Brasil.....	27
2.2 <i>Pinus</i> .....	28
2.3 Desbastes .....	30
2.4 Painéis de madeira: panorama mundial da produção e consumo .....	32
2.5 Oriented Strand Board (OSB).....	33
2.5.1 Produção dos painéis OSB .....	36
2.5.2 Mercado mundial de OSB .....	39
2.5.3. Principais fatores que afetam o desempenho de painéis OSB .....	40
2.5.4 Utilização de insumos alternativos para fabricação do OSB.....	42
2.6 Produção sustentável.....	45
2.7 Avaliação do ciclo de vida.....	46
2.7.1 Estrutura de uma Avaliação do ciclo de vida .....	50
2.7.2 Disseminação da avaliação do ciclo de vida no Brasil .....	56
2.7.3 Avaliação do ciclo de vida aplicado em produtos à base de madeira.....	58
2.8 Considerações a respeito da revisão bibliográfica .....	60
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	63
3.1 Materiais utilizados na fabricação dos OSB .....	63
3.2 Delineamentos experimental.....	64
3.3 Produção dos OSB em laboratório .....	65
3.3.1 Geração das partículas .....	65
3.3.2 Aplicação das resinas.....	66
3.3.3 Formação do colchão de partículas .....	66
3.3.4 Pré-prensagem e prensagem do colchão de partículas .....	67
3.3.5 Esquadrejamento dos painéis.....	67
3.4 Caracterização dos OSB .....	69
3.4.1 Obtenção dos corpos de prova.....	69

3.4.2 Propriedades físicas e mecânicas dos OSB .....	71
3.4.3 Análise estatística .....	75
3.5 Avaliação do ciclo de vida (ACV).....	76
3.5.1 Definição de objetivo e escopo.....	77
3.5.2 Análise do inventário do ciclo de vida (ICV).....	87
3.5.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV).....	87
3.5.4 Interpretação .....	88
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	89
4.1 Caracterização física e mecânica dos OSB .....	89
4.1.1 Teor de umidade e densidade .....	89
4.1.2 Inchamento em espessura e absorção de água.....	90
4.1.3 Flexão estática .....	93
4.1.4 Tração perpendicular às faces.....	100
4.2 Avaliação do ciclo de vida dos OSB.....	102
4.2.1 Definição do objetivo e escopo.....	102
4.2.2 Análise do inventário do ciclo de vida .....	118
4.2.3 Avaliação dos impactos do ciclo de vida dos OSB .....	122
4.2.4 Interpretação .....	148
5 CONCLUSÕES .....	155
5.1 Caracterização física e mecânicas dos OSB .....	155
5.2 Avaliação do ciclo de vida dos painéis em escala laboratorial e industrial .....	156
5.3 Sugestões para trabalhos futuros.....	158
REFERÊNCIAS.....	161

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAF	Associação Baiana das Empresas De Base Florestal
ABIMCI	Associação Brasileira de Industria de Madeira Processada Mecanicamente
ABIPA	Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AGEFLOR	Associação Gaúcha de Empresas Florestais
AI	Adesão Interna
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ANOVA	Análise de Variância
AT	Acidificação Terrestre
CFC	Clorofluorocarbonetos
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
COVNM	Compostos Orgânicos Voláteis- Não metano
DF	Depleção fóssil
DO	Depleção da Camada de Ozônio
EA	Eutrofização de Água Doce
EGP	- Edge Glued Panel
EM	Eutrofização Marinha
ET	Ecotoxicidade Terrestre
ETa	Ecotoxicidade de Água Doce
FAO	Food Agriculture Organization
FOF	Formação de Oxidantes Fotoquímicos
FPL	Forest Products Laboratory
GANÁ	- Grupo de Apoio à Normalização Ambiental
GEE	- Gases do Efeito Estufa
GLP	Gás de Petróleo liquefeito
HDF	Hight Density Fiberboard
IBÁ	Industria Brasileira de Árvores

IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
IPEF	Instituto de Pesquisas Florestais
ISO	International Organization for Standardization
LaMEM	Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeiras
MC	Mudança Climática
MDF	Medium Density Fiberboard
MDI	Metil Difenil Diisocianato
MDP	<i>Medium Density Particleboard</i>
MLC	Madeira Laminada Colada
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
MUF	Melamina-Ureia Formaldeído
OF	Operações Florestais
OPP	Operações de Produção do Painel
OSB	Oriented Strand Board
PA	Potencial de Acidificação
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PDO	Potencial de Depleção de Ozônio
PE	Potencial de Ecotoxicidade
PE	Potencial de Eutrofização
PFFO	Potencial de Formação Fotoquímica de Ozônio
PTH	Potencial de Toxicidade Humana
TH	Toxicidade Humana
UF	Ureia Formaldeído
UNEP	United Nations Environment Programme

## 1 INTRODUÇÃO

Questões relacionadas à sustentabilidade estão cada vez mais presentes em diversos segmentos da sociedade e, principalmente, nas indústrias. Nos últimos anos, a preocupação crescente acerca dos efeitos ambientais decorrentes da produção e utilização de produtos, bem como sua disposição no final do seu ciclo de vida, tem levado ao interesse para a sustentabilidade ambiental dos produtos à base de madeira (SATHRE; GONZÁLEZ -GARCÍA, 2014).

Com a finalidade de melhorar o desempenho ambiental, torna-se importante avaliar o ciclo de vida ambiental dos produtos colocados no mercado (REMMEN, 2007; SILVA et al., 2013). A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma técnica que considera todos os fluxos de entrada e de saída de materiais e energia de um sistema de produto, e que mensura os impactos ambientais potenciais existentes, possibilitando a tomada de decisão no sentido de contribuir para sua redução e/ou eliminação (ABNT NBR ISO 14040, 2006; SILVA, 2012). Assim, essa técnica é utilizada para avaliação e escolha de alternativas ambientalmente mais favoráveis para o sistema do produto estudado, possibilitando estimar impactos ambientais cumulativos resultantes das fases do ciclo de vida do produto, muitas vezes incluindo impactos não considerados em análises mais tradicionais (GIANNETTI et al., 2008).

Atualmente, muitas pesquisas vêm sendo realizadas no âmbito de desenvolvimento e caracterização de novos compósitos à base de madeira, no sentido de encontrar materiais alternativos aos utilizados pela indústria, que causem menos impactos ambientais negativos, porém com propriedades físico-mecânicas semelhantes ou superiores aos produtos comerciais. Neste sentido podem ser destacados os estudos de Ferro (2013) que utilizou a madeira de Paricá (*Schizolobium amazonicum*) e resina poliuretana à base de óleo de mamona na fabricação de *Oriented Strand Board* (OSB); Cavdar et al. (2008) que usaram lignina proveniente do processo de polpação kraft e fenol-formaldeído para adesão de partículas *strands*; Carvalho et al. (2015) que fabricaram OSB com madeira do gênero *Pinus* e resina tânica de *Stryphnodendron adstringens* (Mart.); Macedo et al. (2016) que fabricaram OSB com partículas de polipropileno biorientado (BOPP); Fiorelli et al. (2015) que fabricaram painéis de partículas com fibra de coco; Ayrlimis et al. (2009) que adicionaram diferentes níveis de resíduos de pneu com partículas *strands* na produção de OSB; Varanda et al. (2014) que utilizaram casca de aveia na confecção de painéis de partículas homogêneas etc. Há também estudos como de Chaowana (2013) e Malanit et al. (2011) que utilizaram bambu para fabricação de OSB.

O OSB é um painel de multicamadas, formadas com partículas de madeira do tipo

*strand*, unidas por um aglutinante (adesivo). As partículas das camadas externas estão alinhadas e dispostas no sentido paralelo ao comprimento ou à largura do painel, enquanto que as partículas das camadas internas podem ser distribuídas aleatoriamente ou alinhadas, geralmente, na direção perpendicular à das partículas das camadas externas (EN 300, 2006). Essa estrutura de colchão confere ao OSB excelentes propriedades mecânicas, que permitem sua aplicação em diversas áreas, principalmente na indústria da construção civil, para revestimentos de parede, painéis de telhado, contra pisos etc. (BENETTO et al., 2009; REBOLLAR et al., 2007). O mercado de OSB está crescendo mundialmente, e a perspectiva é que até o ano de 2022 haja uma expansão de aproximadamente 28% (GRAND VIEW RESEARCH, 2015). Em 2016, a empresa LP Brasil, responsável pelo comércio de OSB no país, se destacou entre as maiores do sul do país, com VPG (valor ponderado de grandeza) de 105 milhões de reais (LP BRASIL, 2016).

Fatores como o aumento da substituição da madeira compensada por OSB em novas construções residenciais, reparação e/ou remodelação nos diversos setores da construção civil podem contribuir com tal aumento de mercado ao longo desse período. Associados ao crescimento do setor da construção civil, estão o crescimento do setor moveleiro e de embalagens, os quais também demandam OSB.

Visando as crescentes preocupações relacionadas à sustentabilidade juntamente com desenvolvimento de novos produtos que proporcionem redução dos impactos ambientais potenciais durante sua produção, este trabalho teve como objetivo a utilização de insumos alternativos como resina poliuretana à base de óleo de mamona e madeira proveniente de desbaste para produção de OSB. Além disso, a fim de verificar se tais insumos proporcionam melhor desempenho ambiental aos painéis, utilizou-se a ACV para identificar e quantificar os principais danos ambientais potenciais relacionados ao ciclo de vida *cradle-to-gate* dos OSB fabricados no Brasil, em escala laboratorial e industrial.

Para o contexto brasileiro, vale destacar que até o momento não há estudos de ACV direcionados para o caso da produção de OSB. Este trabalho tem contornos de originalidade e ganha relevância num cenário de disseminação internacional do emprego desses painéis aliada às responsabilidades ambientais das empresas e às pressões que vêm sofrendo ao longo dos últimos anos.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi a avaliação técnica e ambiental da utilização de insumos alternativos, como madeira da espécie de *Pinus* sp. provenientes de desbastes e resina poliuretana à base de óleo de mamona na produção de OSB, além disso, comparar o desempenho ambiental entre os painéis industriais frente aos painéis laboratoriais.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- I. Produção e caracterização de OSB com partículas de madeira da espécie de *Pinus* sp. provenientes de desbastes e aderidas com resina poliuretana à base de óleo de mamona;
- II. Avaliação de diferentes proporções dos componentes da resina, polioli e pré-polímero, sobre as propriedades físicas e mecânicas dos OSB;
- III. Avaliação do ciclo de vida do tipo *cradle-to-gate* de OSB produzidos no laboratório, a fim de verificar o desempenho ambiental dos insumos alternativos utilizados;
- IV. Avaliação do ciclo de vida do tipo *cradle-to-gate* e quantificação dos principais impactos ambientais potenciais associados ao ciclo de vida da produção industrial do OSB no Brasil;



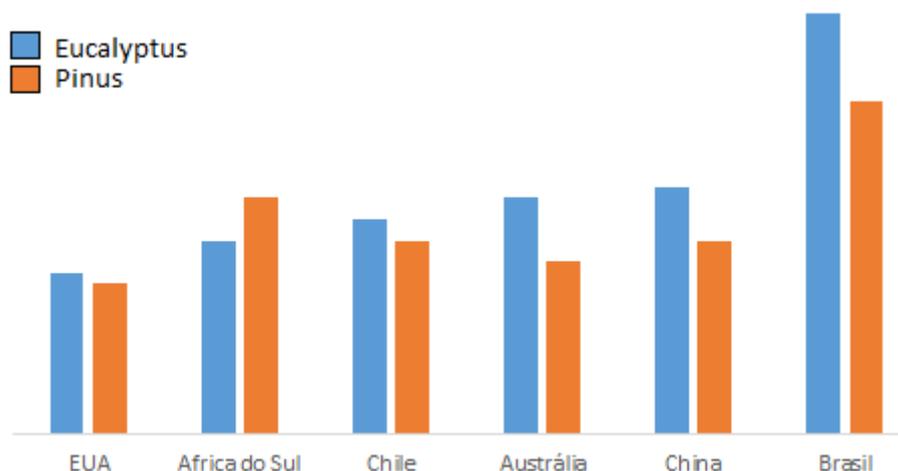
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, a revisão bibliográfica abrange alguns tópicos importantes para elaboração do trabalho, como: recursos florestais no Brasil, em especial os gêneros mais utilizados em reflorestamento como *Pinus* e *Eucalyptus*; painéis compósitos à base de madeira, com foco nos painéis *Oriented Strand Board* (OSB). A revisão bibliográfica também faz alusão à metodologia de Avaliação do ciclo de vida (ACV) (conceito, estrutura de uma ACV, disseminação da metodologia no país), além de citação de pesquisas que avaliaram o desempenho ambiental de produtos à base de madeira com o auxílio da ACV.

### 2.1. Recursos florestais no Brasil

O Brasil é um país com evidente vocação florestal. Além de possuir a segunda maior área coberta por florestas do mundo, ficando atrás apenas da Rússia, em 2014, o Brasil liderou o ranking global de produtividade florestal (ABIMCI, 2013; IBÁ, 2015). A Figura 1 mostra a produtividade média dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* no ano de 2014, observada no Brasil e em outros países considerados importantes produtores mundiais.

**Figura 1-** Produtividade florestal ( $m^3/há.ano$ ) no Brasil *versus* outros importantes produtores florestais mundiais



Fonte: Adaptado de IBÁ (2015).

A área de árvores plantadas para fins industriais no Brasil totalizou 7,74 milhões de

hectares em 2014, aumento de 1,8% em relação a 2013. Os plantios de árvores reflorestadas possuem grande importância para o desenvolvimento sócio econômico brasileiro, principalmente em termos de geração de empregos e rendas (ABIMCI, 2013). Segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2015), o setor brasileiro de árvores plantadas é responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais no país, enquanto que somente 9% são provenientes de florestas nativas legalmente manejadas.

No Brasil os principais gêneros utilizados na produção de madeira reflorestada são *Eucalyptus* e o *Pinus*, ambos consolidados no país. Os plantios de Eucalipto ocupam 5,56 milhões de hectares da área de árvores plantadas no país, o que representa 71,9% do total, enquanto que os plantios de *Pinus* ocupam 1,59 milhões de hectares (20,5%). Acácia (*Acacia* sp.), Teca (*Tectona grandis*), Seringueira (*Hevea brasiliensis*) e Paricá (*Schizolobium amazonicum*) estão entre as outras espécies plantadas no País, com área reflorestada de 0,59 milhões de hectares, ou seja, aproximadamente 7,6% (IBÁ, 2015).

Por ser a principal matéria-prima utilizada neste estudo, detalhes de algumas das principais características do gênero *Pinus* estão apresentados no item a seguir.

## 2.2 *Pinus*

No Brasil, espécies de *Pinus* vêm sendo plantadas há mais de um século. Foram introduzidas principalmente por imigrantes europeus, para fins ornamentais e produção de madeira (SHIMIZU, 2001). Atualmente, o gênero *Pinus* possui 105 espécies identificadas, com grande potencial a ser explorado. Dentre as mais plantadas no Brasil, com produção comercial desde os anos de 1950, estão: *Pinus taeda*, *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea caribaea*, *Pinus caribaea hondurensis*, *Pinus oocarpa* e *Pinus tecunumanii* (CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS-CIFLORESTAS, 2008).

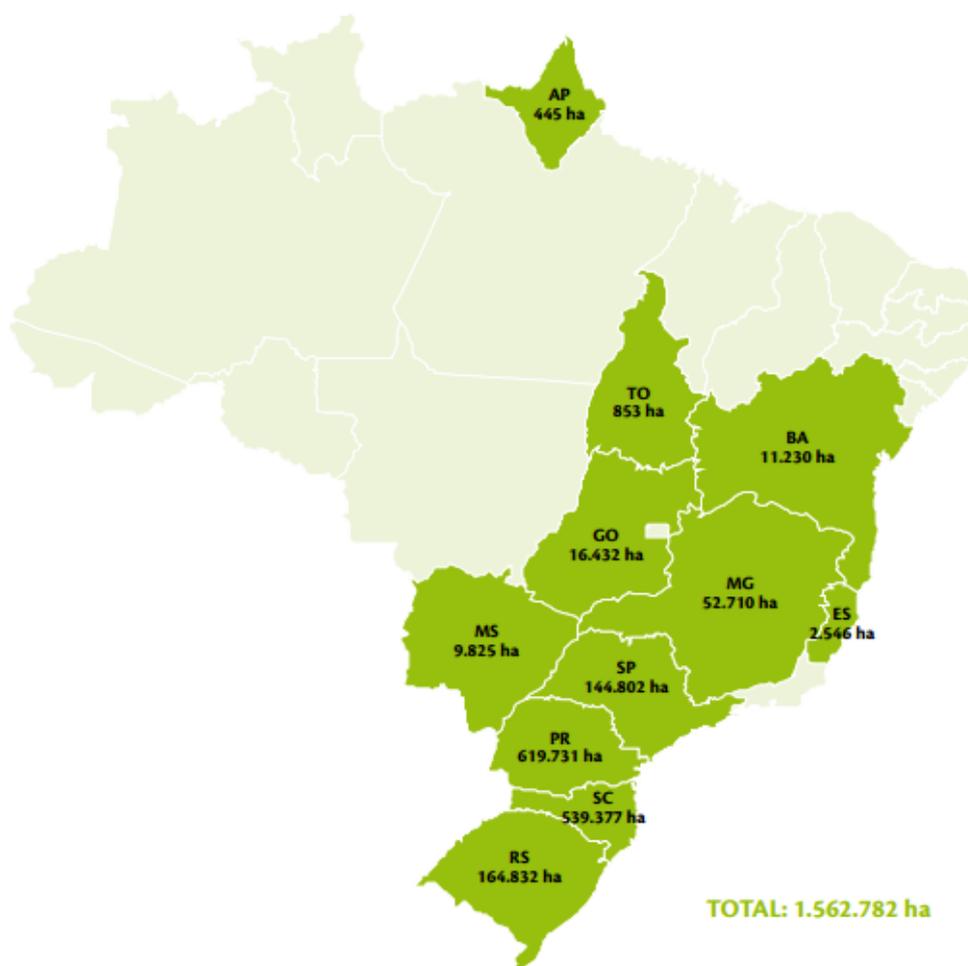
Em 2014, a área brasileira de plantios com espécies desse gênero ultrapassou 1,59 milhões de hectares. Desse total, 84,7% estão concentrados na região Sul do país devido às condições edafoclimáticas e à localização dos principais centros processadores desse tipo de madeira, 14,3% na região Sudeste, enquanto que as regiões Centro Oeste e Nordeste concentram 1,4 e 1,3%, respectivamente, dos plantios do gênero *Pinus*. A área e a distribuição do plantio de *Pinus* pelo país podem ser observadas na Figura 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS- ABRAF, 2013).

A massa específica da madeira de *Pinus* a 12% de umidade da madeira varia entre 520

e  $640 \text{ kg/m}^3$  (BORTOLETTO JUNIOR, 2008; CALIL JUNIOR, 2002). Além disso, a madeira desse gênero apresenta facilidade de usinagem, excelente penetração e interação com adesivos e também grande retenção de tratamento preservante.

Os últimos levantamentos de produtividade florestal no país mostram que, no ano 2014, a produtividade média do *Pinus* atingiu  $31\text{m}^3/\text{ha.ano}$  (IBÁ, 2015). Com relação ao ciclo de corte, no geral as espécies de *Pinus* permitem o primeiro desbaste aos 6 ou 7 anos, quando as árvores estão com aproximadamente 5 m de altura e 12 cm de diâmetro, e o corte raso 15 anos após o plantio das mudas (INSTITUTO DE PESQUISAS FLORESTAIS – IPEF, 2009; SUASSUNA, 1997).

**Figura 2-** Áreas e distribuição dos plantios de *Pinus* pelo Brasil



Fonte: ABRAF (2013).

No que se refere ao gênero *Pinus*, dois regimes padrão de ciclo podem ser adotados – regime de ciclo curto e regime multiproduto.

O regime de ciclo curto visa a produção de toras de menores diâmetros. Neste tipo de regime não há podas e desbastes, e o corte raso é realizado geralmente entre 12 e 18 anos de idade da árvore. Esse regime é adotado quando as toras são destinadas a fabricação de celulose, painéis de madeira reconstituídas e empresas de agronegócios. Já o regime de multiproduto é empregado geralmente na produção de toras de grandes diâmetros. Para isso são necessárias podas e dois ou mais desbastes comerciais, sendo o corte raso feito a partir dos 16 anos de idade. As toras obtidas do regime de multiprodutos visam atender as necessidades de serrarias e laminadoras (ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS- AGEFLOR, 2016).

A madeira de *Pinus* pode ser empregada na fabricação de diversos produtos, sendo os mais representativos, papel e celulose (53,5%), painéis de madeira industrializada (24,4%), produtores independentes (15,9%) e carvão vegetal (6,1%) (ABRAF, 2013).

### 2.3 Desbastes

Desbaste é a retirada de algumas árvores durante o período de desenvolvimento da floresta. O objetivo é diminuir a competição existente entre as plantas, disponibilizando maior quantidade de recursos, principalmente água e luz, para as plantas remanescentes. São eliminadas principalmente árvores mal formadas, tortas, bifurcadas e doentes, mesmo que apresentem dimensões elevadas. Assim, com maior quantidade de recursos, as árvores remanescentes irão apresentar maiores taxas de crescimento, aumentando, desse modo, o volume de madeira por planta (FERREIRA, 2003; SILVA ; ANGELI, 2006).

Segundo Silva e Angeli (2006), para as florestas plantadas podem ser realizados dois tipos de desbaste, o sistemático e o seletivo. O primeiro tipo, principalmente aplicado em reflorestamento com povoamento uniforme, consiste na retirada de uma em 4 linhas de platío. Possui a vantagem de ser mais simples e barato, porém em caso de não uniformidade da floresta, a sua realização resulta em perda de indivíduos superiores. O segundo tipo de desbaste, o seletivo, consiste na retirada de plantas de acordo com certas características pré-estabelecidas, como a presença de defeitos. Para a escolha dessas árvores, é necessária prévia seleção no campo, o que exige maior trabalho. Todavia, melhores resultados na produção e na qualidade são obtidos com esse tipo de desbaste.

No primeiro desbaste chamado de pré-comercial são removidos de 30 a 50% da quantidade de árvores inicialmente plantadas (CASTRO et al., 2011; DIAS, 2000; OBINO e MENEZES, 1995; SCHNEIDER; FINGER, 1994; SCOLFORO et al., 2001; TSUKAMOTO

FILHO et al., 2002). O desbaste pré-comercial ocorre geralmente no 4º ou 5º ano após o plantio das mudas, quando as árvores possuem um diâmetro médio de 12 cm (CASTRO et al., 2011; DIAS, 2000; OBINO; MENEZES, 1995).

No Brasil, essas árvores com diâmetros reduzidos são destinadas principalmente para geração de energia (NOGUEIRA, 2003), enquanto que em outros países como Portugal e Espanha, por exemplo, são utilizadas como matéria-prima para fabricação de painéis de partículas (RIVELA et al., 2006; SILVA et al., 2015).

Estudos mostram que emissões provenientes da queima da madeira são altamente variáveis e dependentes de fatores como condições da queima e equipamentos utilizados. A combustão completa é muito difícil de alcançar e a combustão incompleta resulta na formação de vários subprodutos como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, partículas, além de compostos altamente perigosos como dioxinas, dibenzodioxinas policloradas etc. (MCDONALD et al., 2000; KRALOVEC et al., 2002; YASUHARA et al., 2003). Além disso, segundo Cornelissen e Hirs (2002), que realizaram um estudo para quantificar a depleção de recursos naturais de diferentes tratamentos de resíduos de madeira, a fabricação de painéis de madeira causa menos depleção dos recursos naturais do que a combustão de resíduos em uma usina de carvão.

Vários autores citam a utilização da madeira de desbastes para produção de painel OSB (BORTOLETTO JUNIOR; GARCIA, 2004; CLOUTIER, 1998; EISFELD; BERGER, 2012; IWAKIRI, 2005; WALKER, 1993).

Heräjärvi et al. (2004) a partir de toras desbastes com 50 mm de diâmetro, gerou partículas *strands* com dimensões aproximadas de 100 mm de comprimento, 10-30 mm de largura e 0,5 mm de espessura para fabricação de OSB. Os resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas foram compatíveis aos exigidos por norma para diversas aplicações estruturais do painel.

Han et al. (2007a) avaliaram o desempenho físico e mecânico de painéis OSB produzidos com madeira de diâmetro entre 7 e 15 cm provenientes de desbastes. O painel a base de madeira foi confeccionado em três camadas, sendo as camadas superficiais compostas de partículas *strands*, e a camada interna composta com partículas *strands* e cinco proporções diferentes de finos (0, 10, 20, 30 e 45%), baseadas na massa total de partículas do painel. Os autores tiveram resultados satisfatórios para resistência e estabilidade dimensional quando comparados com documentos normativos, por exemplo. Ainda, foi constatado que, o aumento da proporção de finos no painel, ocasionou melhor desempenho com relação a expansão linear

na direção paralela à orientação das partículas e ligação interna.

## **2.4 Painéis de madeira: panorama mundial da produção e consumo**

Painéis à base de madeira podem ser definidos como produtos compostos de elementos de madeira como lâminas, sarrafos, partículas em diferentes estágios de desagregação e fibras, reconstituídos através de pressão e temperatura juntamente com aglutinantes, tais como: resinas sintéticas, aglutinantes minerais e aditivos semelhantes.

Os painéis à base de madeira podem substituir a madeira maciça em diferentes usos das indústrias de construção civil e moveleiras. As vantagens da utilização desse tipo de material em relação à madeira sólida residem, especialmente, nos aspectos de rendimento em relação ao volume das toras, diminuição da anisotropia, utilização de madeiras de reflorestamento e de rápido crescimento e madeiras de densidade média que, na confecção do painel, confere rigidez suficiente para aplicação estrutural (BIAZUS et al., 2010; MENDES; ALBUQUERQUE, 2000).

Alguns autores como Biazus et al. (2010) e Mattos (2008) classificam os painéis a base de madeira em dois tipos: os fabricados a partir de madeira reconstituída e os confeccionados com base na madeira processada mecanicamente. Os painéis de madeira reconstituída são fabricados com base no processamento da madeira, que passa por diferentes processos de desagregação tendo como principais produtos: os aglomerados *Medium Density Particleboard* (MDP), o *Oriented Strand Board* (OSB), o *Medium Density Fiberboard* (MDF), o *Hard Density Fiberboard* (HDF). Já os chamados painéis de madeira processada mecanicamente são formados por camadas de lâminas como os painéis compensados e laminados ou sarrafos de madeira maciça como o *Edge Glued Panel* (EGP).

O Brasil está entre os países mais avançados na fabricação de painéis de madeira a partir de árvores plantadas. Este fato se deve aos contínuos investimentos em tecnologia e automação das empresas e processos produtivos, além das melhores práticas e operações florestais (CARVALHAES, 2016). Em 2014, a produção mundial de painéis a base de madeira atingiu 388 milhões de m<sup>3</sup> (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO, 2015).

Segundo dados da indústria brasileira de árvores – IBÁ (2015), neste mesmo ano o Brasil ocupou a sétima posição no ranking dos maiores produtores mundiais de painéis de madeira reconstituída, responsável por 8 milhões de m<sup>3</sup>. A China ocupou a primeira posição, com aproximadamente 149 milhões de m<sup>3</sup>, enquanto os Estados Unidos, com 18,5 milhões de m<sup>3</sup>, ocupou a segunda colocação (ASSOCIAÇÃO BAIANA DAS EMPRESAS DE BASE

FLORESTAL (ABAF), 2013; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA (ABIPA), 2011; VIDAL; HORA, 2014).

Com relação aos maiores consumidores mundiais de painéis à base de madeira, os países que ocuparam as primeiras posições, em 2014, corresponderam aos maiores produtores de painéis, sendo por ordem de colocação: China, Estados Unidos, Rússia, Alemanha e Japão, sugerindo que os produtos são consumidos principalmente pelo mercado doméstico (FAO, 2015). Este fato também foi verificado no Brasil, pois do volume total de painéis de madeira reconstituída produzidos em 2014 no país, 95% (7,6 milhões de m<sup>3</sup>) foram destinados ao mercado doméstico, enquanto que os 5% restantes (0,4 milhões de m<sup>3</sup>) foram exportados (IBÁ, 2016).

Ainda, segundo Carvalhaes (2016), o consumo de painéis de madeira no Brasil está muito atrelado ao setor de construção civil. Sendo assim, no ano de 2015, o impacto gerado pela redução do consumo interno em meio à queda na atividade econômica e principalmente do setor de construção civil, fez com que as empresas do setor direcionassem maior volume dos seus produtos para exportação, ocasionando conseqüentemente aumento de aproximadamente 58% do volume de painel exportado.

Segundo Vidal e Hora (2014), MDF e MDP são os destaques, com 26 e 32%, respectivamente, do consumo global. Os autores apontam que o OSB é o terceiro mais relevante entre os painéis de madeira reconstituída, superando as chapas de fibras. Dentre os painéis citados, o OSB é um dos produtos mais recentes, com produção mundial relevante a partir de 1998. Possui maior gama de aplicações comparado aos MDP/MDF, e capacidade de substituir os compensados em muitos casos. Por essas razões a próxima seção aborda as características mercadológicas e técnicas deste produto.

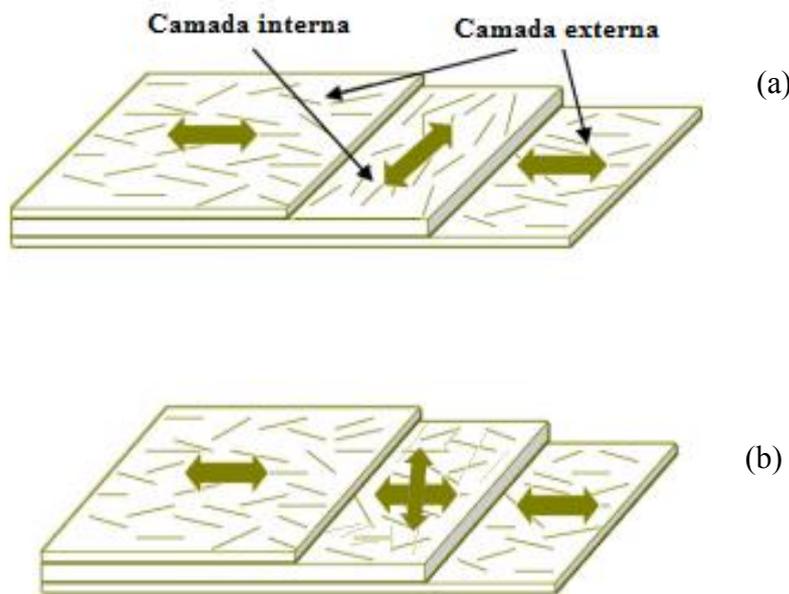
## **2.5 Oriented Strand Board (OSB)**

Segundo a norma europeia EN 300 (2006), o OSB é um painel de múltiplas camadas formadas com partículas de madeira do tipo *strand*, unidas por aglutinante (adesivo). As partículas das camadas externas estão alinhadas e dispostas no sentido paralelo ao comprimento ou à largura do painel, enquanto as partículas das camadas internas podem ser aleatórias ou alinhadas, geralmente, na direção perpendicular à das partículas das camadas externas. A Figura 3 ilustra as disposições das partículas nos painéis OSB.

As partículas *strand* são produzidas com dimensões aproximadas de 25 mm de largura, 90 a 150 mm de comprimento e 0,50 a 0,75 mm de espessura. Sua geometria, orientação e

formação em camadas (geralmente três: face/miolo/face) conferem ao OSB maior resistência na flexão estática e melhor estabilidade dimensional na comparação, por exemplo, com painéis *waferboards*, os quais não possuem partículas orientadas (CLOUTIER, 1998; IWAKIRI, 2005). O controle do tamanho das partículas *strands*, a orientação e a construção em camadas permitem ao OSB ser concebido para satisfazer os diferentes usos da indústria da construção civil e moveleira (FOREST PRODUCTS LABORATORY-FPL, 2012).

**Figura 3-** Posicionamento das partículas nas camadas internas do OSB. a) OSB com partículas internas distribuídas aleatoriamente. b) OSB com partículas internas orientadas

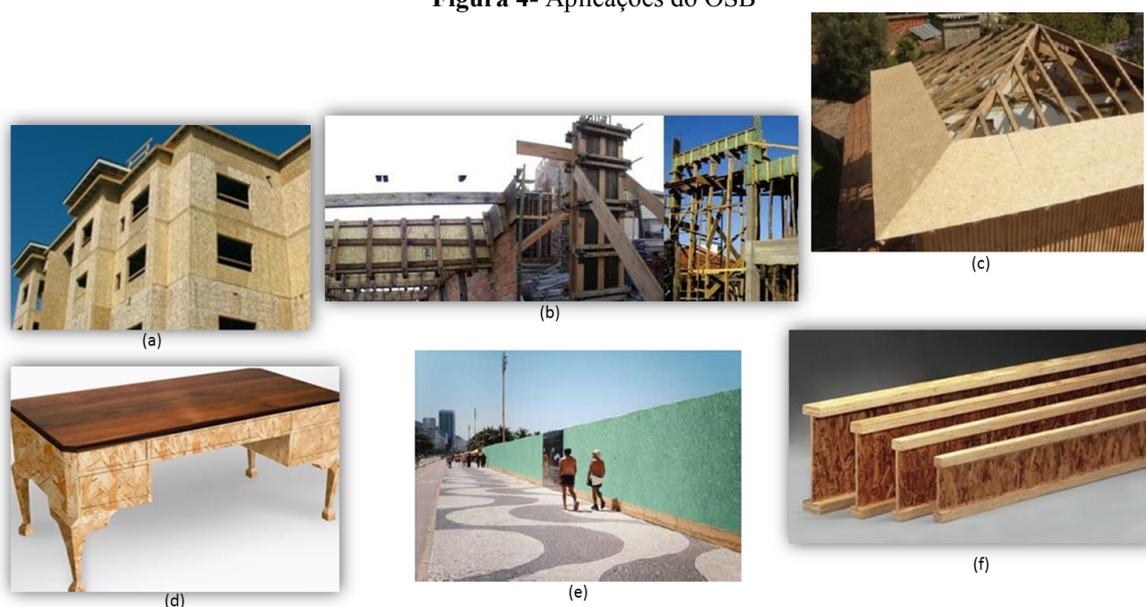


Fonte: Adaptado de Hermawan et al. (2007).

A principal aplicação do OSB é na indústria de construção civil, pois suas características físicas e mecânicas permitem seu uso para fins estruturais. Podem ser empregados em pisos, forros, tetos, paredes, vigas, fôrmas de concreto, batentes de portas etc. (PIVA, 2006; TOMASELLI, 1998).

Piva (2006) ainda destaca algumas utilizações não estruturais do OSB como: barras de camas, tampos de mesa, assentos de cadeira, estruturas de estofados, painéis decorativos, tábuas de passar roupas, além de parte interna de carrocerias de furgões e embalagens industriais. A Figura 4 mostra alguns exemplos de utilização do OSB.

**Figura 4-** Aplicações do OSB



Fonte: a) APA – OSB (2009); b) LP Brasil (2012); c) APA – OSB (2009); d) Treehugger (2008); e) LP Brasil (2012); f) Tecniwood (2012).

Segundo a EN 300 (2006) os OSB podem ser classificados em quatro categorias, as quais se diferenciam pelo tipo de aplicação e capacidade de resistir a umidades elevadas, sendo elas:

- OSB/1: Painéis para uso geral sem capacidade de carga e painéis componente interiores utilizados em ambientes secos;
- OSB/2: Painéis para fins estruturais para uso em ambientes secos;
- OSB/3: Painéis para fins estruturais para uso em ambientes úmidos;
- OSB/4: Painéis especiais para fins estruturais utilizados em ambientes úmidos.

O Brasil possui apenas uma fábrica produtora de OSB, a LP (Louisiana Pacific Corporation) Brasil, que está localizada em Ponta Grossa, estado do Paraná. A principal matéria-prima utilizada na fabricação dos painéis é a madeira de *Pinus* sp. Todavia, a empresa possui capacidade produtiva de 350 mil m<sup>3</sup> por ano e possui 13 tipos de produtos, os quais se diferenciam em relação ao tipo de resina empregada e, conseqüentemente, ao tipo de aplicação (LP BRASIL, 2016). O OSB “home”, por exemplo, é uma linha de painéis fabricados com resina metil difenil diisocianato (MDI), a qual confere aos painéis alto desempenho físico-mecânico, permitindo sua aplicação nos mais variados setores da construção civil.

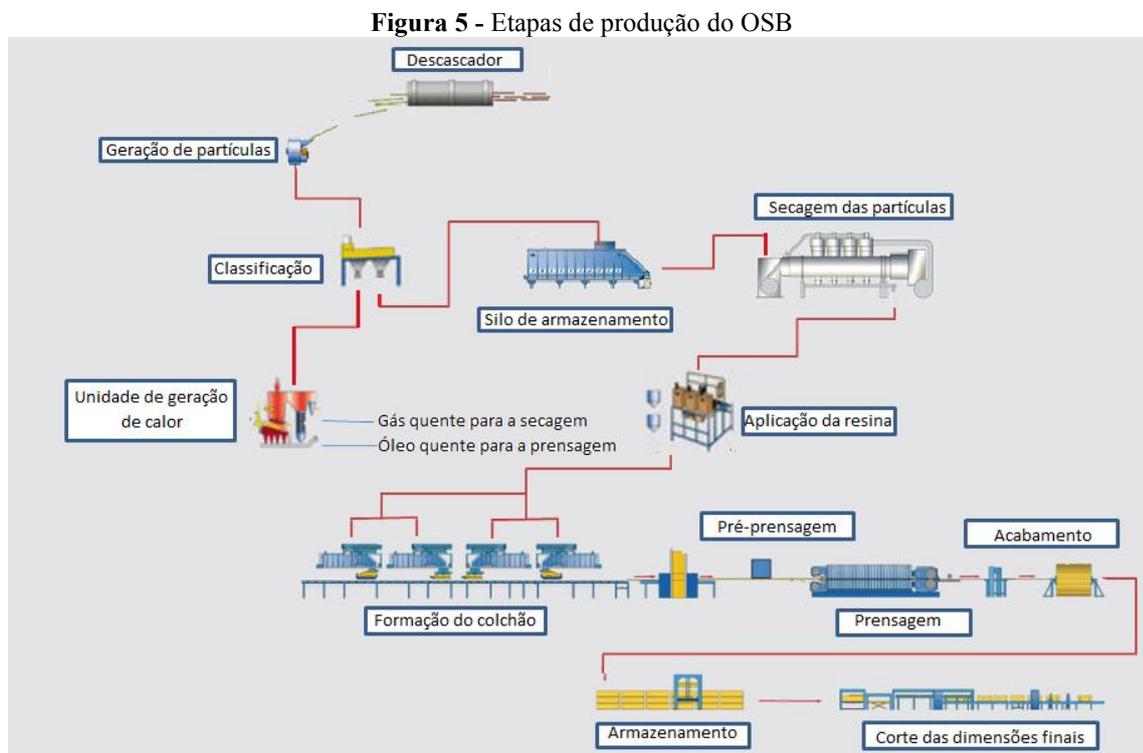
A demanda por painéis OSB vem aumentando, visto que sua resistência na flexão estática, em alguns casos, pode ser análoga à dos compensados estruturais, aos quais pode substituir. Enquanto a indústria de compensado vem encontrando cada vez mais dificuldade em obter toras de alta qualidade com dimensões necessárias para extrair as lâminas, a indústria de

OSB pode utilizar madeira de menor qualidade, de crescimento rápido e sem restrições de comprimento e diâmetro (EINSFELD et al., 1998). Além disso, há a possibilidade de se utilizar o rolo resto, resíduo gerado da laminação de toras, como matéria-prima para produção de OSB.

Segundo a LP-Brasil (2016), para a produção de OSB é possível um aproveitamento de 96% da tora, enquanto que para a produção de compensado o aproveitamento médio é de apenas 56%. Com isso, o produto pode ter seu custo otimizado e pode se apresentar como ecologicamente mais eficiente.

### 2.5.1 Produção dos painéis OSB

O processo de produção de painéis OSB envolve as seguintes etapas: acondicionamento das toras no pátio; descascamento de toras; geração de partículas *strands*; armazenamento das partículas úmidas; secagem das partículas; classificação das partículas; aplicação do adesivo e de aditivos químicos; formação do colchão; pré-prensagem e prensagem a quente; acabamento e acondicionamento. A Figura 5 mostra as etapas do processo produtivo dos OSB.



Fonte: Adaptado de Shengyangjx.en.alibaba.com (2016).

Cada uma das etapas supracitadas é descrita a seguir com base em bibliografia consultada e na descrição dos técnicos da empresa brasileira de OSB.

### *Acondicionamento das toras no pátio*

Ao chegar à fábrica, as toras de *Pinus elliottii* e/ou *Pinus taeda*, cujo diâmetro médio é de 30 cm, são armazenadas em pátios de toras antes do seu processamento. O descarregamento das toras dos caminhões e o carregamento das mesmas para o processo industrial é realizado por intermédio de carregadores mecânicos (SILVA, 2012).

### *Descascamento de toras*

As toras são descascadas por meio de fricção em um descascador tipo tambor rotativo, no qual promove a fricção entre as toras pelo movimento de suas partes internas, fazendo com que a casca seja removida. A casca removida representa de 10% a 17% do volume das toras, e esta é aproveitada como biomassa na geração de energia térmica para o processo de fabricação de OSB (IWAKIRI, 2005).

### *Geração de partículas strands'*

Nesta etapa as toras passam por um picador, o qual a fragmenta em partículas denominadas *strands*. As facas do picador estão ajustadas para gerar *strands* com espessura de 0,75 a 0,85 mm, 40 a 50 mm de largura e 250 mm de comprimento (LP BRASIL, 2016; SOUZA, 2012).

### *Armazenamento das partículas úmidas*

Após serem geradas, as partículas seguem para o silo de armazenamento. Esses silos também têm a função de proteger as partículas das intempéries, principalmente a umidade, a qual exerce grande influência na qualidade final dos painéis.

### *Secagem das partículas*

Nesta fase, as partículas são secas através do contato com gás quente até atingir o teor de umidade apropriado, normalmente entre 4% e 6%. O fluxo de gás quente deriva da combustão da casca e da biomassa residual como finos provenientes do processo de classificação e do corte, em uma unidade de geração de calor (LP BRASIL, 2016). Os secadores são de tubos rotativos, de um a três passos (IWAKIRI, 2005).

### *Classificação das partículas*

Este processo classifica materiais finos de madeira das partículas secas, pois os finos

são considerados muito pequenos para a formação do OSB, e pode afetar a qualidade final do produto. As partículas rejeitadas são queimadas na unidade de geração de calor de modo a produzir o calor requerido na etapa de secagem bem como para aquecer o óleo utilizado na máquina de prensagem. Já as partículas *strands* seguem para a aplicação do adesivo e dos aditivos químicos como inseticida e parafina.

#### *Aplicação do adesivo e de aditivos químicos*

Nesta fase, a resina líquida juntamente com uma pequena quantidade de parafina é pulverizada sobre as partículas *strands* dentro de uma encoladeira. Conforme relatado anteriormente, a resina MDI é utilizada na produção do tipo OSB “*home*”, uma vez que confere ao painel qualidade superior (isto é, melhores desempenhos físico e mecânico). Além disso, é também aplicado um preservante a base de piretróide. A aplicação da parafina e do preservante piretróide visa melhorar a higroscopicidade do produto acabado e a resistência do painel ao ataque de organismos deterioradores, respectivamente.

A porcentagem de resina aplicada é 5 a 8% dependendo do produto em relação ao peso seco das partículas, enquanto que o teor de parafina e piretróide são 1 e 0,4%, respectivamente, para o OSB do tipo “*home*”.

#### *Formação do colchão*

As partículas encoladas são direcionadas para a unidade de formação do colchão onde são dispostas em três camadas. As partículas das camadas externas estão dispostas perpendicularmente à camada interna. A orientação das partículas é realizada por cabeçotes. O colchão de partículas é posteriormente submetido a pré-prensagem.

#### *Pré-prensagem e prensagem a quente*

O colchão formado passa pela pré-prensagem, que compacta o mesmo e retira o excesso de ar localizado no interior do colchão, além de efetuar uma ligeira redução de espessura do mesmo através de uma força aplicada perpendicularmente ao painel (IWAKIRI, 2005; SILVA, 2012). O colchão de partículas pré-prensado segue para a prensa contínua, onde ocorre a consolidação do colchão através da aplicação de pressão e temperatura durante um tempo específico, promove a cura da resina e densificação do colchão de partículas até espessura desejada. A temperatura de prensagem varia de acordo com a resina empregada no processo de produção dos painéis, para a resina MDI, utilizada na produção do OSB “*home*” é utilizada

temperatura de 240°C.

#### *Acondicionamento e acabamentos*

Após a prensagem, os painéis são cortados em serras, e, em seguida, encaminhados para o acondicionamento, que tem por finalidade reduzir a temperatura dos painéis a fim de mantê-la em equilíbrio com o ambiente.

Por último, os painéis são seccionados e lixados para uniformização da espessura e remoção das irregularidades das suas superfícies. Em geral os OSB são comercializados pela indústria *in natura*, ou seja, sem nenhum tipo de revestimento.

### **2.5.2 Mercado mundial de OSB**

O mercado de OSB está crescendo mundialmente. Até o ano de 2022 a perspectiva de crescimento é de aproximadamente 28% (GRAND VIEW RESEARCH, 2015). O aumento da substituição da madeira compensada por OSB em novas construções residenciais, reparação e/ou remodelação nos diversos setores da construção civil são fatores que poderão proporcionar o aumento da demanda do OSB ao longo do período de previsão supracitado.

Além disso, avanços tecnológicos no desenvolvimento de novos produtos em países como a Índia, Rússia, China e Brasil são esperados para criar oportunidades de crescimento de mercado desses painéis ao longo dos próximos anos (GRAND VIEW RESEARCH, 2015).

Os Estados Unidos e Canadá são os maiores produtores e consumidores de OSB. Em 2014, foram responsáveis por 55% do mercado mundial, com uma produção de 17,5 milhões de m<sup>3</sup> (GRAND VIEW RESEARCH, 2015). Nesse mesmo ano, a Europa produziu aproximadamente 5,8 milhões de m<sup>3</sup> (FAO, 2015), enquanto que o Brasil e o Chile produziram cada um aproximadamente 200.000 m<sup>3</sup> de OSB, e caracterizaram-se como maiores produtores de OSB da América do Sul (LP BRASIL, 2016).

A perspectiva de uso do OSB no Brasil não se diferencia muito do cenário mundial. Os sistemas construtivos que utilizam principalmente OSB em sua estrutura, conhecidos como *wood frame* estão avançando no país. Além de já ser possível receber financiamento pela Caixa Econômica Federal, o sistema construtivo *wood frame* foi utilizado na construção de conjuntos habitacionais do programa federal Minha Casa Minha Vida. Mais de 400 casas de aproximadamente 45 m<sup>2</sup> foram entregues a famílias de baixa renda em cidades como: Maricá-RJ, Sapucaia, -RS, Rio Bom-PR, Curitiba-PR, Sorocaba-SP, Dourados-MS, Pelotas-RS

(TECVERDE, 2016). Tal empresa, uma das principais que utilizam o sistema construtivo *wood frame*, entregou mais de 1300 casas em 2016, e prevê aumento de quase 300% em sua produção para o ano de 2017 (TECVERDE, 2016), o que significa expressivo aumento do consumo de OSB no mercado da construção civil brasileiro.

### 2.5.3. Principais fatores que afetam o desempenho de painéis OSB

Uma das mais importantes variáveis do processo produtivo de painéis particulados é a espécie de madeira, pois suas características anatômicas interagem com as outras variáveis do processo e, além disso, determinam a massa específica do painel e o tipo de partícula a ser produzida. A utilização de determinada espécie na fabricação de painéis depende principalmente da disponibilidade de matéria-prima (MENDES et al., 2002).

No Brasil, como supracitado, a empresa brasileira produtora de OSB, LP Brasil, utiliza madeira do gênero *Pinus*. Todavia, estudos comprovam a viabilidade do uso de espécies de *Eucalyptus* juntamente com resina fenol-formaldeído (CABRAL et al., 2006; IWAKIRI et al., 2002; IWAKIRI et al., 2004), bem como com resina poliuretana à base de óleo de mamona (RENZO, 2008) na fabricação de OSB, sendo uma alternativa à utilização de *Pinus* sp.

A geometria (comprimento, largura e espessura) e orientação das partículas é um importante fator no desempenho dos painéis de partículas, pois afeta diretamente suas propriedades físicas e mecânicas (MOLESMI, 1974).

Segundo Iwakiri (2005), a variação na geometria da partícula possibilita a produção de diferentes tipos de painéis, com propriedades distintas e adequadas para aplicações específicas, tais como: MDP, *flakeboard*, OSB, *waferboard*. Além disso, a geometria da partícula influencia diretamente no inchamento em espessura, uma das propriedades mais importantes em termos de estabilidade dimensional do painel. Brito e Silva (2002) em estudo realizado para chapas de partículas, concluíram que painéis produzidos com menor granulometria de partículas apresentaram menores valores em inchamento em espessura, enquanto chapas produzidas com maiores granulometrias, tiveram melhores resultados de resistência à flexão estática. Irle (2012) afirma que partículas de menor comprimento promovem ao painel de partículas melhor qualidade superficial, maior dureza e maiores propriedades de ligação interna.

Suzuki e Takeda (2000), em estudos com OSB, afirmam que partículas mais longas podem aumentar o MOR, e que este aumento pode ser atribuído às propriedades longitudinais da madeira, que contribuem efetivamente nas propriedades das chapas. Com relação à orientação das partículas, Cloutier (1998), Iwakiri et al. (2002) e Mendes (2002) verificaram

que a proporção de partículas face/miolo/face é de 1:3:1 (baseado na porcentagem na massa seca das partículas encoladas), ocasiona aumentos significativos nas propriedades MOE (módulo de elasticidade) e MOR (módulo de ruptura) na direção perpendicular e redução dos valores das propriedades de absorção e inchamento após 2 e 24 horas de imersão em água. As diferenças nas propriedades de flexão estática no sentido paralelo e perpendicular podem ser reduzidas com a utilização da relação face/miolo/face de 1:2:1 (SUZUKI; TAKEDA, 2000).

As propriedades físicas e mecânicas dos painéis de partículas também sofrem influência direta dos parâmetros de prensagem como tempo, temperatura e pressão. O tempo e temperatura estão relacionados à cura da resina e à liberação de umidade em forma de vapor, enquanto que a pressão está relacionada com a densificação do colchão. O tempo de prensagem deve ser suficiente para que o centro do painel atinja a temperatura necessária para a cura da resina e a liberação da umidade em forma de vapor pelas bordas do painel. Este tempo depende principalmente da eficiência da transferência de calor, da espessura do painel, da temperatura de prensagem, assim como da distribuição da umidade no colchão de partículas. Já o nível de pressão influencia no tempo de fechamento da prensa. Quanto maior a pressão específica aplicada, menor será o tempo de fechamento da prensa, resultando em chapas com maior densificação nas camadas superficiais (maior gradiente vertical de densidade).

Estudos mostram que para OSB fabricados com madeira de *Pinus* e *Eucalyptus* juntamente com resina poliuretana à base de óleo de mamona, excelentes desempenhos físicos e mecânicos foram obtidos quando produzidos com os seguintes parâmetros de prensagem: tempo de 10 minutos, temperatura de 100° C e pressão de 4,0 MPa (FERRO et al., 2015; SOUZA et al., 2014; VARANDA et al., 2014). A temperatura de prensagem é um parâmetro totalmente dependente do tipo de adesivo. Por exemplo, painéis fabricados com resina ureia-formaldeído, fenol-formaldeído exigem temperatura de prensagem de 160° C, enquanto que a resina poliuretana à base de óleo de mamona exige temperatura de 100° C.

Com relação à escolha da resina, está condicionada ao uso e ao custo do produto. O adesivo é o componente de maior custo de produção, portanto, a quantidade utilizada deve ser otimizada, em função as propriedades requeridas para a finalidade a que se destina o painel (MENDES, 2011; SURDI, 2012).

Grande parte das empresas produtoras de OSB na América do Norte utiliza a resina fenol-formaldeído (FF). Já no Brasil, o tipo de adesivo utilizado varia de acordo com a aplicação do painel. Painéis que necessitam de maior qualidade e maiores desempenhos são fabricados com resina MDI, como o OSB “home”, já o OSB Tapume, outra linha de OSB da indústria

brasileira, é fabricado com resina FF.

#### 2.5.4 Utilização de insumos alternativos para fabricação do OSB

Atualmente, muitas pesquisas vêm sendo realizadas no âmbito de desenvolvimento e caracterização de novos materiais à base de madeira, principalmente no que diz respeito à seleção de materiais mais eficientes e com maior aplicabilidade. Aliado a isso, estão também as preocupações ambientais e, conseqüentemente, a busca de materiais com menor consumo de energia em sua produção, que sejam menos impactantes ao meio ambiente e que contemplem o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos e não lignocelulósicos (BERTOLINI, 2014; MACEDO et al., 2016; VARANDA et al., 2014).

Neste sentido, alguns estudos desenvolvidos com OSB no qual foi avaliada a viabilidade de utilização de insumos alternativos podem ser destacados. Com relação ao uso de novas espécies como substituição ao *Pinus* sp., usualmente empregado pela indústria brasileira, Ferro et al. (2015) utilizaram madeira de Paricá (*Schizolobium amazonicum*), Surdi (2012) utilizou diferentes proporções de madeira do híbrido *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribea* var. *hondurensis*, Nascimento et al. (2015) utilizaram madeira da caatinga do nordeste brasileiro, enquanto que Bufalino et al. (2015) produziram OSB utilizando mix de espécies como *T. ciliata*, híbrido de *Eucalyptus* e *Pinus oocarpa*. Todos os autores obtiveram resultados compatíveis aos exigidos por norma para aplicação do painel em diversas áreas da construção civil.

No que diz respeito à inserção de materiais não lignocelulósicos na matriz do OSB e a superfície do painel, pode-se destacar o estudo de Souza (2012), que produziu OSB de *Pinus* sp. com adição de telas metálicas a fim de aumentar os valores de resistência e rigidez do painel. No entanto, o autor não observou melhoras significativas com a inserção de tal material. Macedo et al. (2016) fabricaram OSB com adição de polipropileno biorientado (BOPP) e observaram melhora significativa na estabilidade dimensional do painel. Dias et al. (2016) utilizaram epicarpo do coco de babaçu na matriz do OSB, com o objetivo de melhorar a resistência mecânica do compósito. Os autores tiveram resultados compatíveis aos encontrados na literatura.

Como mencionado, a fabricação do OSB não exige alta qualidade da madeira. Sendo assim, toras de menores diâmetros, como as provenientes de desbastes, bem como resíduos oriundos da laminação de toras, conhecidos como rolo resto, ou elementos estruturais que tiveram sua vida útil encerrada, podem ser aproveitados como matéria-prima para fabricação deste painel. Neste sentido, alguns estudos, no qual foi avaliada a viabilidade de utilização de

resíduos na produção do OSB podem ser destacados. Heräjärvi et al. (2004) utilizaram toras de 50 mm de diâmetro oriundas de desbastes, Hermawan et al. (2009) utilizaram resíduos de podas e resíduos de porcelana, enquanto que Hermawan et al. (2007) usaram resíduos de madeira provenientes da construção civil como matéria-prima para fabricação do OSB. Os resultados obtidos por todos os autores atenderam aos requisitos normativos e foram compatíveis aos encontrados na literatura.

Silva (2012) avaliou a influência da adição de resíduos de madeira nos impactos potenciais do ciclo de vida da produção brasileira de MDP. Muitos países da Europa, como Espanha e Portugal, por exemplo, e Estados Unidos utilizam resíduos de madeira como matéria-prima para fabricação de painéis de partículas. Os resultados obtidos pelo autor apontam redução de aproximadamente 38% nos impactos ambientais potenciais ao se utilizar 100% de resíduo como matéria-prima para produção do MDP. Todavia é ressaltado que tais benefícios ambientais verificados com o uso do resíduo dependem de algumas variáveis como: aspectos ambientais do ciclo de vida dos resíduos; quantidade de resíduos aplicada na produção dos painéis, critério de alocação adotado na ACV, e por fim, distância no percurso de transporte dos resíduos até a unidade fabril.

O uso de resinas alternativas a ureia-formaldeído, fenol-formaldeído, bem como MDI, comumente empregadas pelas indústrias, também vêm sendo altamente estudadas.

Os adesivos à base de formaldeído, como o fenol-formaldeído, aplicado geralmente pela indústria de OSB, são classificados como agentes de insalubridade máxima devido à emissão do formol, substância considerada cancerígena (BERTOLINI, 2014; CHIPANSKI, 2006). Além disso, muitos estudos caracterizam a resina a base de formaldeído como um dos principais agentes responsáveis pelos danos ambientais potenciais durante o ciclo de vida de um painel à base de madeira (KLINE, 2010; SILVA, 2012). Os painéis fabricados com adesivos à base de formaldeído, além de emitir o formaldeído durante o seu processo produtivo, também libera, durante sua vida útil, partículas desta substância. Desta forma, ao longo das últimas décadas, os níveis aceitáveis de emissão de formaldeído dos produtos à base de madeira vêm sendo continuamente reduzido.

Em consequência da redução do formaldeído no adesivo, o desempenho físico-mecânico dos painéis também pode ser afetado, bem como podem ocorrer significativas modificações no processo de produção das fábricas (MARKESSINI et al., 2010). Sendo assim, resinas alternativas estão sendo testadas e algumas já estão sendo utilizadas em substituição as resinas a base de formaldeído.

Entre essas resinas alternativas, podem ser destacadas as poliuretanas, como a MDI, por exemplo, a qual já vem sendo utilizada pelas indústrias produtoras de painéis a base de madeira, principalmente de OSB. Obtida pela reação de polióis (compostos que contêm grupo de hidroxilo) com isocianatos (podendo ser poliésteres ou acrílicas), oferece algumas vantagens em relação às resinas à base de formaldeído (ALBUQUERQUE, 2010). Entre elas pode-se destacar a alta adesão e rápidos ciclos de prensagem. Entretanto, sua desvantagem está relacionada à alta aderência com alumínio e outros tipos de aço, causando problemas durante a etapa de prensagem (MARRA, 1992).

Neste aspecto, diversos estudos podem ser citados como o de Cavdar et al. (2008) que substituíram aproximadamente 50% do fenol da resina fenol-formaldeído por lignina kraft hidrolisada. Os autores concluíram que a fabricação do OSB utilizando tal resina proporciona painéis com propriedade para uso externo, além de emitir baixa taxa de formaldeído durante o processo produtivo. Carvalho et al. (2015) produziram OSB com adesivo tânico de barbatimão e comparou os resultados de propriedades físicas e mecânicas com OSB fabricados com resinas comerciais como ureia-formaldeído e fenol-formaldeído. Os resultados obtidos mostram que não houve diferenças estatísticas entre os valores do inchamento em espessura e da absorção de água, bem como entre os módulos de elasticidade na direção paralela e perpendicular e módulo de ruptura na direção perpendicular, para os painéis fabricados com as três resinas avaliadas.

Neste seguimento, a resina poliuretana à base de óleo de mamona também deve ser destacada. Desenvolvida no Instituto de Química, da Universidade de São Paulo na cidade de São Carlos, a resina poliuretana a base de mamona é obtida a partir da mistura do polioliol, óleo derivado da planta *Ricinus communis* e do isocianato. O óleo (polioliol) é obtido a partir da compressão das sementes ou por extração com solventes. Com relação ao componente isocianato, o mais consumido pelo mercado de poliuretanos é o MDI. A variação na porcentagem dos componentes da resina (polioliol e isocianato) define resistências diferentes, podendo também ser empregados catalisadores de forma a aumentar a velocidade de reação (DIAS, 2008). A cura da resina poliuretana à base de mamona pode ser processada em temperatura ambiente e pode ser acelerada em temperaturas acima de 60° C (SOUZA et al., 2014). Já para resinas como FF e MDI a cura é acelerada em temperaturas superiores a 160°C (LP BRASIL, 2016). Sendo uma resina alternativa as comerciais, vem sendo muito utilizada em diversos estudos no âmbito de compósitos a base de madeira (BERTOLINI, 2014; DIAS, 2005; MACEDO et al., 2016; SANTOS et al., 2014; VARANDA, 2016).

Ferro et al. (2015) avaliaram três porcentagens de resina poliuretana à base de óleo de mamona, 8, 10 e 12%, juntamente com madeira da espécie de Paricá (*Schizolobium amazonicum*) na fabricação de OSB. Os resultados, além de serem compatíveis aos de norma

para painéis estruturais com alta capacidade de carga, mostram que os teores de resina avaliados não conferiram diferenças significativas ao desempenho físico-mecânico dos painéis.

Souza (2012) analisou as propriedades de resistência e rigidez de OSB fabricados com madeira de *Pinus* sp., aderidos com 12% de resina poliuretana à base de óleo de mamona e reforçados com telas metálicas. Os resultados obtidos mostram que somente a combinação entre madeira e adesivo foi suficiente para proporcionar propriedades estáticas satisfatórias em relação a norma EN 300 (2006).

Nascimento et al. (2015) avaliaram o desempenho da resina poliuretana à base de óleo de mamona juntamente com espécies de madeira da caatinga do Nordeste brasileiro de alta densidade. Os autores concluíram que os resultados obtidos para as propriedades mecânicas dos painéis foram bastante satisfatórios, apresentando-se superiores aos de OSB comerciais e produtos análogos provenientes de outras espécies encontrados na literatura.

## **2.6 Produção sustentável**

A Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1991) define desenvolvimento sustentável como “desenvolvimento que satisfaça as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações”.

Para a União Internacional para a Conservação da Natureza e dos Recursos Naturais (1991) desenvolvimento sustentável é “processo que melhora as condições de vida das comunidades humanas e, ao mesmo tempo, respeita os limites da capacidade de suporte dos ecossistemas”.

Desenvolvimento sustentável a longo prazo é uma preocupação fundamental em muitos países. Souza (2002) afirma que desde a Conferência de Estocolmo no ano de 1972, organizada pelas Nações Unidas (ONU) para tratar de assuntos relacionados à degradação do meio ambiente, que questões ambientais foram inseridas de forma prioritária e definitiva na agenda internacional. O autor relata ainda que desde então, problemas ambientais mudaram de significado e importância, e estão cada vez mais presentes nos diferentes elementos que influem nas decisões empresariais.

Em respostas as preocupações relacionadas aos problemas ambientais, surgiram muitas regulamentações sobre o impacto ambiental danoso dos produtos durante o seu ciclo de vida, incluindo o compromisso de criar estratégias eficazes de logística reversa para gerir materiais pós-uso (SATHRE; GONZÁLEZ-GARCÍA, 2014). Afinal, para Chehebe (1997), todo produto, não importa de qual material seja fabricado, provoca algum tipo de mudança ao meio ambiente, seja em função de seu processo produtivo, das matérias-primas que consome, ou devido ao seu

uso ou disposição final.

Além da conscientização da indústria com as questões ambientais nas últimas décadas, a sociedade também se faz mais consciente. Barbosa Junior et al. (2008) e Bedante (2004) relatam que a pressão do mercado, no qual requer padrões de produtos mais adequados, e as crescentes exigências da legislação ambiental vêm induzindo as organizações a uma relação mais sustentável com o ambiente. Além disso, para Souza (2002), as pressões ambientais podem ser impostas sobre a empresa por fornecedores e compradores, por acionistas, bancos ou investidores, por consumidores e/ou por concorrentes. Com isso, as práticas ambientais corporativas, estão deixando cada vez mais de ser apenas “questões ambientais”, e têm se tornado uma questão de estratégia competitiva entre empresas, marketing, finanças, relações humanas, eficiência operacional e desenvolvimento de produtos.

O desempenho ambiental de produtos e processos tornou-se uma questão-chave. Muitas empresas passaram a investigar maneiras de minimizar seus efeitos sobre o meio ambiente, por intermédio de estratégias de prevenção da poluição e sistemas de gestão ambiental. Dessa forma, garantem melhoria dos seus produtos sob uma perspectiva ambiental e aceleram sua introdução no mercado nascente de produtos verdes ou ecológicos (BOVEA; GALLARDO, 2004).

Portanto, para que o desenvolvimento sustentável seja atingido, Rebitzer (2004) menciona a necessidade de métodos e ferramentas que ajudem a quantificar e comparar os impactos ambientais dos bens (produtos) e serviços para a sociedade. Entre as metodologias que encontram-se disponíveis, a Avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma metodologia que permite avaliar os impactos ambientais associados aos materiais, produtos e serviços, bem como apoio às estratégias de tomada de decisão para a sustentabilidade (BAUMANN; TILLMAN, 2004). Por essa razão, a metodologia de ACV tem recebido atenção especial nos últimos anos para analisar os impactos ambientais derivados de diferentes setores de produção como agropecuária (CHERISTERI et al., 2009), florestal (KLEIN et al., 2015), bioenergia (CHERUBINI; JUNGMEIER, 2010) e alimentos (ROY et al., 2009). Assim, este método é utilizado para a proposta, avaliação e escolha de alternativas mais ecológicas para um sistema de produção específico (ABNT NBR ISO 14040, 2006). Os conceitos sobre ACV estão descritos no próximo item.

## **2.7 Avaliação do ciclo de vida**

No passado recente, as propostas relacionadas às reduções dos impactos ambientais tinham como foco o perímetro interno das empresas. No entanto, as iniciativas mais atuais,

passaram a buscar a diminuição e até mesmo a eliminação dos impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida do produto e/ou processo, ou seja, a análise dos impactos passou a ser em todas as fases, desde a extração da matéria-prima e transporte, à produção e consumo, incluindo ainda a disposição final e seu reuso (MOTTA, 2016).

Para United Nations Environment Programme - UNEP (2012) o conceito do ciclo de vida implica no entendimento de que materiais são extraídos da terra, processados, combinados com outros materiais para fazer peças e/ou componentes, montados em um produto acabado, distribuídos aos usuários e, finalmente, são descartados após deixarem de cumprir a finalidade para o qual foi projetado. Para Hauschild et al. (2008), essas são etapas e atividades necessárias para que um produto desempenhe sua função. Ao longo desta cadeia de valor, energia e outros recursos naturais, sociais e econômicos também são utilizados, além disso, resíduos são gerados, gases de efeito estufa (GEE) são liberados e outros impactos relacionados, tanto positivos como negativos, são causados a sociedade e ao meio ambiente (HAUSCHILD et al., 2008; MOTTA, 2016). Para o conhecimento dos impactos ambientais totais causados pelo produto ou serviço, faz-se necessário uma análise que abranja todo o ciclo de vida do produto, como mostrado de forma geral na Figura 6.

Consolidado o conceito de ciclo de vida, é então possível conceituar Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) como método capaz de avaliar as interações entre as atividades humanas e o meio ambiente, cuja abrangência compreende todas as etapas necessárias para que um produto cumpra sua função, ou seja, desde a aquisição dos recursos naturais aplicados na sua fabricação até sua disposição final após o cumprimento da sua finalidade (ABNT NBR ISO 14040, 2009, CHAUHAN et al., 2011; CHEHEBE, 1997; SILVA, 2016). Além disso, é um método reconhecido internacionalmente para conhecer melhor os aspectos ambientais de um produto ou sistema (ABNT NBR ISO 14044, 2006).

Segundo Jefferies et al. (2012), a perspectiva da ACV é a identificação dos “*hotspots*”, termo comumente utilizado para identificar atividades que possuem impactos ambientais potenciais significantes durante o ciclo de vida do produto, processo e serviço.

Ainda, de acordo com a MOTTA (2016) e UNEP (2012), o processo de ciclo de vida disponibiliza informações relevantes não somente sobre os impactos ambientais, mas como sociais e econômicos, para que os gestores tenham informações para tomada de decisões. Desta forma, critérios de sustentabilidade ambiental podem ser incorporados tanto no setor público como no setor privado, visando o desenvolvimento de novas políticas para projetos e produção de produtos, bem como para compras e prestação de serviços.

Para Zocche et al. (2015) o uso da ACV como uma ferramenta para essas finalidades vem ganhando ampla aceitação, isso se deve ao fato de que todos os impactos, diretos e indiretos são avaliados através desta metodologia.



Fonte: Silva (2016).

Para Pereira (2004) e Santos (2010) a utilização da ACV em programas de avaliação ambiental é interessante para todas as partes envolvidas, consumidores, empresas e para o governo. Para os consumidores, essa metodologia pode auxiliar na escolha de um produto que seja menos impactante ao meio ambiente. Para as empresas e fabricantes, pode contribuir na comparação de diferentes processos e produtos, ocasionar melhorias ambientais e econômicas em seus produtos, além de promover a imagem da empresa com relação as responsabilidades ambientais. Já para o governo, implementação de ACV pode ser suporte para definir as prioridades legais e determinação de taxas de impostos.

A ACV pode ser utilizada para uma grande variedade de propósitos, pois, segundo Barbosa Junior. et al. (2007), se trata de um forte instrumento para o gerenciamento dos aspectos ambientais das várias fases do sistema de produção. Dentre os propósitos para realização do estudo de ACV, autores como ABNT NBR ISO 14040 (2009), EPA (2006), Ferreira (2004), Silva (2012) e Zocche (2014), ressaltam:

- Identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de produtos em diversos pontos de seus ciclos de vida;
- Avaliação dos efeitos humanos e ecológicos do consumo de material e as liberações no meio ambiente que ocorrem em uma comunidade, região e/ou mundo;
- Comparação dos impactos ambientais entre dois ou mais produtos que exercem a mesma função ou de processos;
- Identificação dos impactos em uma ou mais áreas específicas do ambiente de interesse;
- Fornecimento detalhado de informação aos tomadores de decisão na indústria e nas organizações governamentais ou não governamentais, tendo em vista, o planejamento estratégico, à definição de prioridades;
- Seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes;
- Quantificar as descargas ambientais para o ar, água, e solo relativamente a cada estágio do ciclo de vida e/ou processos que mais contribuem;
- Possibilita estratégias de marketing, como por exemplo, implementação de um esquema de rotulagem ambiental, ou na elaboração de uma declaração ambiental de produto.

De acordo com Argonne (2007), muitas vezes não é necessária a realização de uma avaliação geral de toda a cadeia de impactos de um sistema ou processo, para que os objetivos de uma ACV sejam atingidos. Nestes casos, apenas uma aplicação parcial da ACV pode ser suficiente. As variações da ACV parcial, segundo a norma ISO TS 14048 (2002), são apresentadas a seguir:

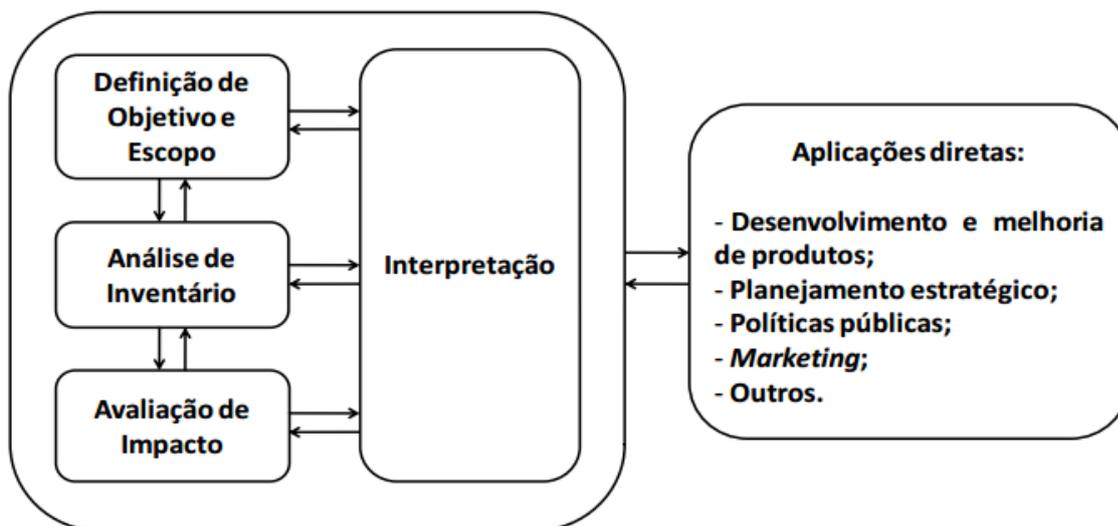
- Abordagem “*cradle- to- gate*” ou do berço ao portão: envolve desde a extração de recursos, que pode incluir algumas operações de fabricação ou operações de serviço, mas exclui todas as fases subsequentes;
- Abordagem “*cradle-to-grave*” ou berço ao túmulo: envolve todas as etapas do ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até a disposição final;
- Abordagem “*gate-to-gate*” ou portão ao portão: envolve um processo em que todas as fases de produção ocorrem dentro de um local (indústria). O local pode ser geograficamente especificado, ou, no caso de dados genéricos, a especificação geográfica pode ser mais geral. Processos fora dos portões do local definido não estão incluídos;
- Abordagem “*gate-to-grave*” ou portão ao túmulo: inclui processos de distribuição, o uso e o descarte final do produto.

A metodologia da ACV é estruturada e normatizada internacionalmente pela Organização Internacional para Normalização (ISO), pertencendo à série ISO 14040 (2006) (*Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*) e 14044 (2006) (*Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*). Ambas são consideradas as principais e mais importantes normas para avaliação ambiental baseada no ciclo de vida do produto. A transcrição das normas internacionais para o Brasil foi feita pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com a criação das normas NBR ISO 14040 (2009) (Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura) e NBR ISO 14044 (2009) (Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações) (SILVA, 2012; ZOCHE et al., 2015).

### 2.7.1 Estrutura de uma Avaliação do ciclo de vida

De acordo com a norma brasileira ABNT NBR ISO 14040 (2009), a ACV compreende quatro fases: (1) Definição de objetivo e escopo; (2) Análise de Inventário; (3) Avaliação de impacto; e (4) Interpretação. A interação entre as quatro fases da ACV pode ser observada na Figura 7.

Figura 7- Fases de uma ACV



Fonte: ABNT NBR ISO 14040 (2009).

A seguir cada fase da ACV é brevemente descrita.

#### *Definição de Objetivo e Escopo*

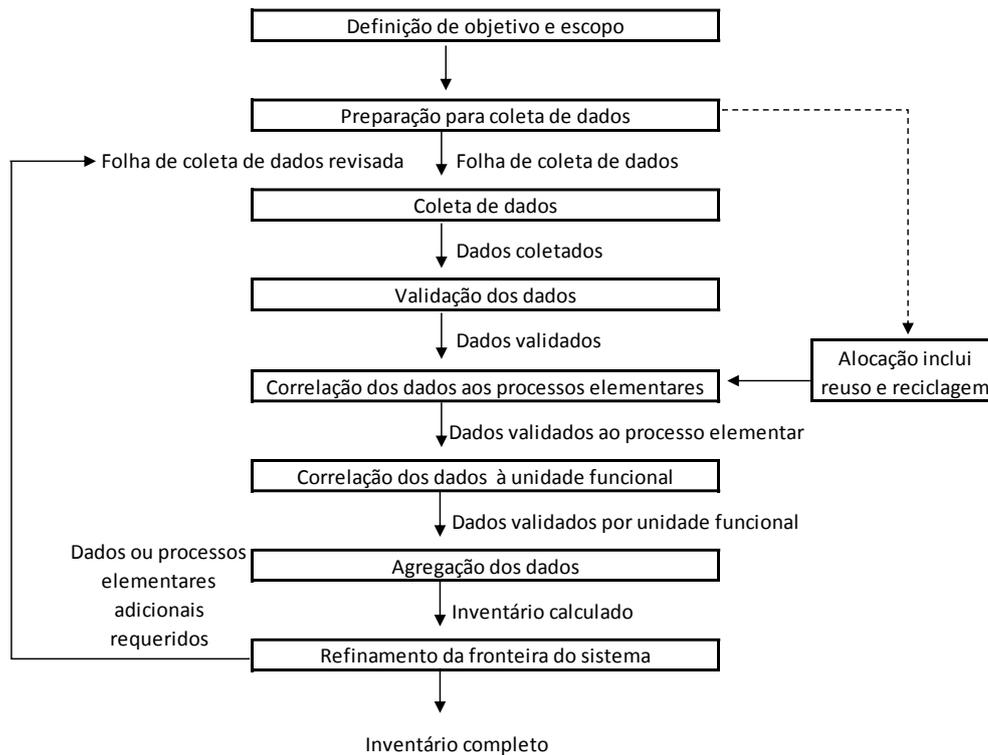
Definição do objetivo e escopo consistem na primeira etapa de um estudo de ACV. Em primeiro lugar, é definido o objetivo do estudo. Segundo a norma ABNT NBR ISO 14040 (2006) neste momento deve ser claramente estabelecido a principal razão para realização do estudo, a aplicação e o público alvo a que os resultados se destinam. Em seguida, é definido o escopo, momento em que, para Seo e Kulay (2006), serão considerados aspectos metodológicos essenciais para a execução do estudo, tais como: as funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas; a unidade funcional; a fronteira do sistema; procedimentos de alocação; metodologia de AICV e tipos de impacto; interpretação a ser utilizada; requisitos de dados; pressupostos; escolha de valores e elementos opcionais; limitações; requisitos de qualidade dos dados; tipos de revisão crítica, se aplicável; tipo e formato do relatório requerido para o estudo (ABNT NBR ISO 14044, 2009). Além disso, a norma brasileira ressalta que o escopo deve ser suficientemente bem definido para assegurar que a abrangência, a profundidade e os detalhes do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender à meta declarada.

#### *Análise de Inventário do ciclo de vida*

A análise do inventário do ciclo de vida está relacionada com a coleta dos dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto, tais como: fluxos de poluentes, materiais e recursos relevantes de um sistema produtivo, balanço de massas e fluxos energéticos que contribuem para questões ambientais (ABNT NBR ISO 14040, 2009; ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE, 2009; SHERWANI et al., 2010).

O inventário deve ser estabelecido de modo a assegurar que os fluxos de entrada e de saída estejam padronizados a partir de uma unidade funcional, a qual é definida com base na função a qual o produto se propõe a cumprir (ABNT NBR ISO 14044, 2009; SILVA, 2016).

Zocche (2014) ressalva que, durante a execução do ICV, convém que sejam seguidos passos operacionais. A ISO 14044 (ABNT NBR ISO 14044, 2009) define essa sequência de passos para análise do inventário apresentada no fluxograma da Figura 8.

**Figura 8-** Procedimento simplificado para análise de inventário

Fonte: ABNT NBR ISO 14044 (2009).

Como mostra a Figura 8, a ABNT NBR ISO 14040 (2009) resume as atividades de ICV em 3 grupos principais, **coleta de dados**, **cálculo com os dados** e **alocação de fluxos e liberações**.

A coleta de dados está relacionada a coleta dos fluxos diretos e indiretos associados a cada processo elementar. Os fluxos diretos são coletados diretamente nos locais de produção (registro de produção, registro de compras e vendas, atestado de abrangência ambiental, medidas e determinações locais, etc). Na sua ausência, podem ser utilizados dados secundários obtidos a partir de bancos de dados, os quais fornecem os fluxos indiretos.

Atualmente, segundo Cherubini e Ribeiro (2015) existem mais de 38 bases internacionais de dados de ACV. Entre as principais bases de dados, os autores destacam: a *European reference Life Cycle Database (ELCD)*, da União Européia; *Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Ecoinvent)*, da Suíça, *GaBi database*, da Alemanha; *U. S. Life Cycle Inventory Database (USLCI)*, dos Estados Unidos; *Inventory Database for Environmental Analysis (IDEA)* do Japão. Além disso, o Brasil também já conta com um banco de dados nacional para o ICV de produtos brasileiros, o denominado Sistema de Inventário do Ciclo de Vida do Brasil (SICV Brasil). O SICV Brasil foi lançado em 2016, e é gerenciado pelo Instituto Brasileiro de Informações em Ciência e Tecnologia – IBICT (IBICT, 2016).

Por fim, as bases de dados que auxiliam na realização de inventários e os métodos de

avaliação AICV estão inseridos em *softwares* comerciais que auxiliam na estruturação de estudos de ACV. No que diz respeito a *softwares* de gestão e manipulação de dados percebe-se que na Europa e no Brasil existe uma maior tendência ao uso do SimaPro®, do GaBi e do Umberto e o openLCA (CHERUBINI; RIBEIRO, 2015).

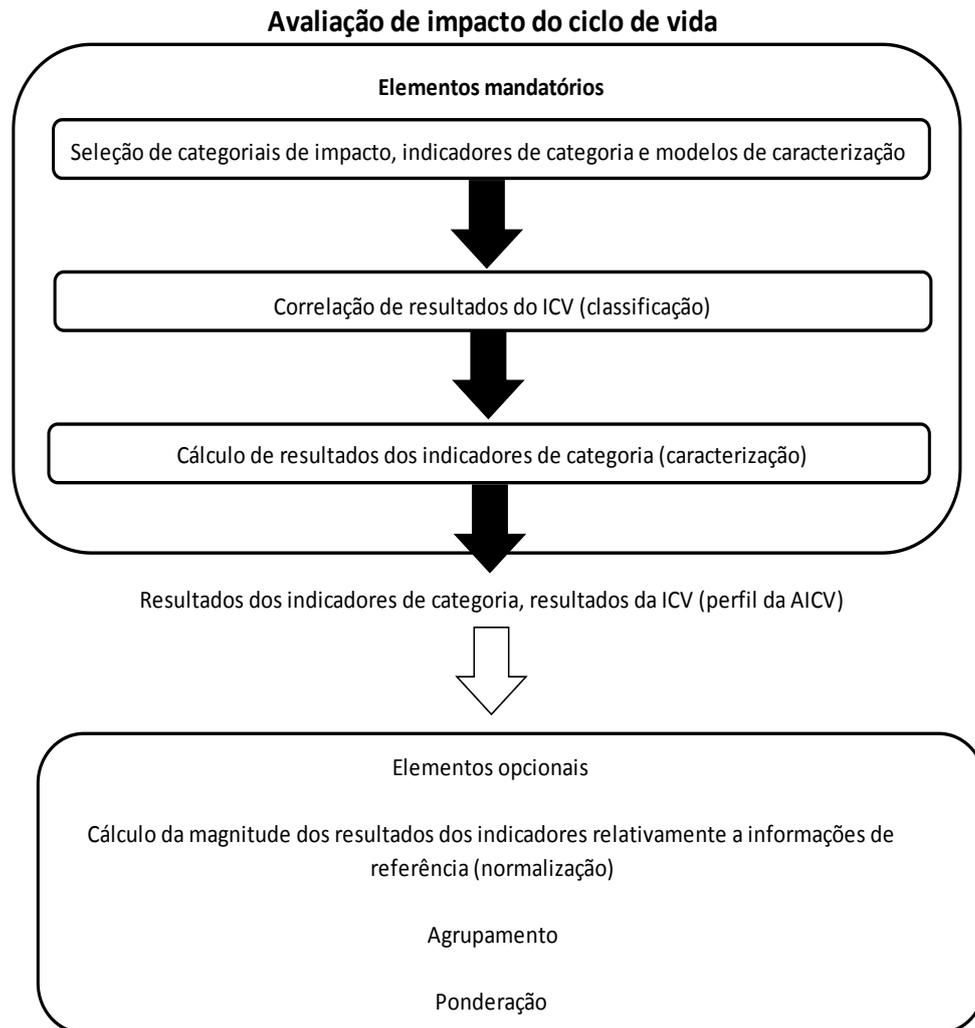
A próxima etapa do ICV é o cálculo dos dados, onde o procedimentos de cálculo são aplicados para o tratamento dos dados. O objetivo, segundo a ABNT NBR ISO 14044 (2009) é validação dos dados coletados,3 correlação dos dados aos processos elementares; correlação dos dados aos fluxos de referência e a unidade funcional.

A última etapa dos procedimentos para análise de inventário, a **alocação de fluxos e liberações**, visa em considerar a necessidade de procedimentos de alocação quando se tratar de sistemas que envolvem múltiplos produtos e sistemas de reciclagem (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

#### *Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)*

A AICV consiste na terceira etapa da ACV. Nesta fase, os resultados dos dados obtidos na análise de inventário são utilizados para avaliar a magnitude e significância dos impactos ambientais. De maneira geral, esses dados são associados com categoriais de impactos específicas e indicadores de categoria, tentando desta forma entender tais impactos associados a produtos e processos. A escolha dos impactos avaliados e das metodologias utilizadas bem como o nível de detalhes depende do objetivo e do escopo do estudo (ABNT NBR ISO 14044, 200; CHEHEBE, 1997; ZOCHE, 2014).

Ainda segundo a norma ABNT NBR ISO 14044 (2009), a AICV consiste em elementos mandatórios e opcionais, como mostra a Figura 9.

**Figura 9-** Elementos mandatórios e opcionais da fase de AICV

Fonte: ABNT NBR ISO 14044 (2009).

Na etapa de seleção de categoriais de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização são identificados as categorias de impacto e indicadores de categoriais e modelos de caracterização considerando-se a preocupação ambiental (CHEHEBE, 1997). Segundo Coltro, (2007) as categorias de impacto representam classes de problemas ambientais relevantes que podem ser provocados ou agravados, pelos aspectos ambientais do produto em estudo.

Klein et al. (2015) analisaram os principais estudos sobre ACV realizados no setor florestal nos últimos 20 anos. Os autores destacam que dentre os estudos avaliados, os pontos quentes “hotspots” de um sistema ou de um processo foram especificados usando diferentes categoriais de impacto. No total de 26 estudos analisados, 14 categorias de impactos foram detectadas. A categoria de Potencial de Aquecimento Global (PAG) apareceu em 100% dos estudos. Outras categorias também consideradas importantes, pois tiveram bastante aparição foram: Potencial de Acidificação (PA) e Potencial de Eutrofização (PE), ambas com 46%,

Potencial de Formação Fotoquímica de Ozônio (PFFO) com aparecimento de 35%. Outras categorias de impacto como Potencial de Depleção de Ozônio (PDO), Potencial de Toxicidade Humana (PTH), Potencial de Ecotoxicidade (PE), também foram utilizados em alguns dos estudos avaliados, no entanto, em menor intensidade.

O seguinte elemento mandatário da AICV, denominado correlação de resultados do ICV ou classificação, correlaciona as cargas ambientais de inventário com as diferentes categoriais de impacto selecionadas na etapa anterior (SILVA, 2016).

Por fim, a última etapa denominada cálculo de resultados dos indicadores de categoria ou classificação envolve a conversão dos dados do inventário atribuídos a uma determinada categoria em um indicador numérico (indicadores de categorias) e a agregação dos resultados convertidos dentro de cada categoria de impacto (ABNT NBR ISO 14044, 2009; CHEHEBE, 1997; SILVA, 2016).

Com relação às etapas opcionais, a normalização visa expressar a magnitude das pontuações de impacto em uma escala comum a todas as categorias de impacto (HAUSCHILD et al., 2008; MENDES, 2013). O agrupamento consiste em agregar e, se possível, hierarquizar as diversas categorias de impacto na mesma unidade (ABNT NBR ISO 14044, 2009), enquanto a ponderação é a conversão dos resultados dos indicadores das diferentes categorias de impacto a uma escala comum, baseada em escolha de valores (GARCIA, 2012). Silva (2016) ainda destaca que a categoria de impacto pode ser destacada em relação às demais por meio de um fator de ponderação (peso) que lhe é atribuído.

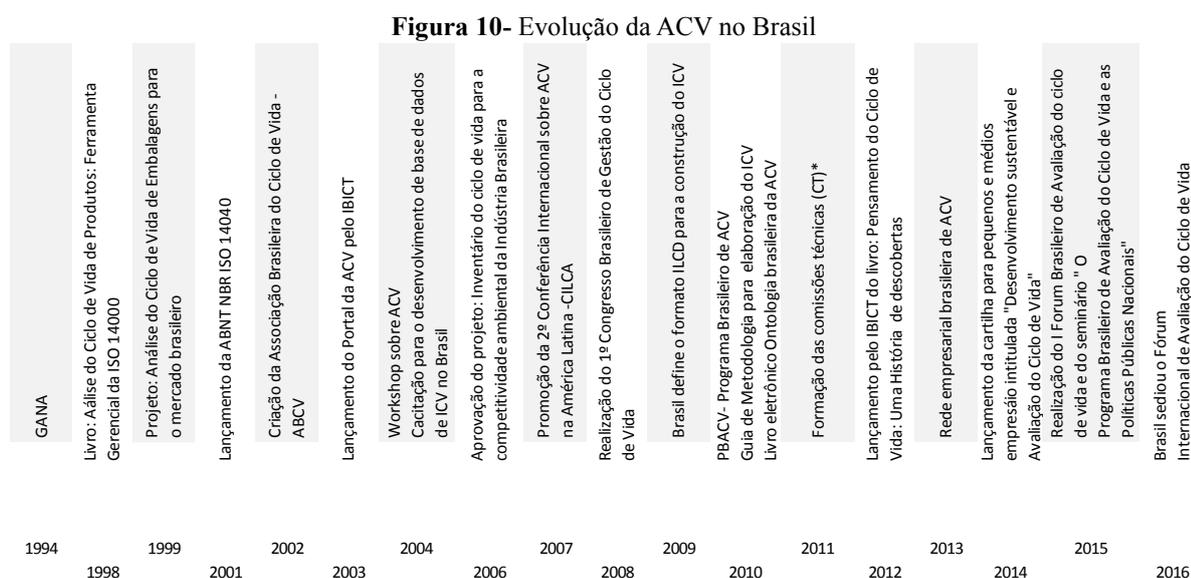
### *Interpretação*

É a última etapa da ACV e consiste na identificação e análise dos resultados obtidos nas fases de inventário e/ou avaliação de impacto de acordo com o objetivo e o escopo do estudo, previamente definido (ABNT NBR ISO 14044, 2009; CHEHEBE, 1997). Além disso, autores como Hauschild et al. (2005) citam que o resultado da interpretação pode ser uma conclusão que pode ser utilizada como recomendação para os tomadores de decisão, os quais normalmente consideram impactos ambientais e de recursos junto com outros critérios de decisão, como aspectos econômicos e sociais para tomada de decisão.

## 2.7.2 Disseminação da avaliação do ciclo de vida no Brasil

A Avaliação do ciclo de vida, teve seu início nos Estados Unidos na década de 1960 com o estudo de ciclo de vida realizado pela Coca Cola a respeito de suas garrafas (REED, 2012). No Brasil, as primeiras ações sobre ACV são da década de 1990 (CHEHEBE, 1997; SANTOS et al., 2007; SILVA; KULAY, 2006; WILLERS et al., 2013). O grande marco foi a criação de um subcomitê específico sobre o tema junto ao Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GANA) (SEO; KULAY, 2006; WILLERS et al., 2013). O GANA surgiu a partir de uma iniciativa de empresas, associações e entidades de importantes segmentos econômicos e técnicos do país, com o apoio da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (CHERUBINI, 2015).

Desde então, o desenvolvimento da ACV no Brasil foi marcado por diversos acontecimentos. Em 2015, o IBICT publicou um relatório no qual os principais marcos da evolução e disseminação da ACV no país foram apresentados de forma cronológica, conforme representação da Figura 10.



\* Comissões Técnicas (CT): CT1 Captação de Recursos, CT2 Inventários, CT3 Avaliação de Impactos, CT4 Difusão e CT5 Formação e Capacitação (BRASIL, 2011a).

Fonte: Adaptado de CHERUBINI (2015); MOTTA (2016).

Para Davis (2015) o campo de pesquisa em ACV está consolidado no mundo acadêmico e conta com periódicos revisados e processos de verificação dos profissionais habilitados a conduzir os estudos de ACV. Nos últimos, houve um expressivo crescimento nas publicações, destacando-se a aplicação da ACV nos campos de produção de combustíveis (principalmente

biocombustíveis), construção civil, energia, agronegócio e gerenciamento de resíduos sólidos. No entanto, no Brasil, a ACV ainda é pouco explorada pelas empresas e associações nacionais como uma prática de gestão ambiental (CHERUBINI; RIBEIRO, 2015; COELHO FILHO et al., 2016), pois alguns fatores ainda limitam sua aplicação no país.

A publicação, em 2016, do Banco Nacional de Inventários de Ciclo de Vida dos produtos brasileiros, SICV Brasil, disponível gratuitamente, é a maior contribuição do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) ao fortalecimento da ACV no país. Além disso, tende a superar uma importante limitação quanto ao uso da ACV no país, pois como apontado em um estudo realizado por Zocche (2014), no qual foram analisados 183 trabalhos entre teses e dissertações, a principal limitação da aplicação da metodologia no país era a falta de um banco de dados nacional com características referentes às condições brasileiras. A falta de disponibilidade de dados para realização do inventário nacional também foi apontada por autores como Cherubini e Ribeiro (2015) e Silva (2012), como obstáculo para o desenvolvimento de projetos de ACV, uma vez que a quantidade de dados é muito elevada transpondo as barreiras de controle da empresa interessada em conduzir o estudo.

A ausência de dados também favorece outras limitações relacionadas a aplicação da ACV. O levantamento dos dados de uma ACV, realizado na etapa de ICV, foi apontado como uma das fases mais trabalhosas e difíceis da aplicação dessa metodologia, despendendo conseqüentemente, de muito tempo e custo. Além disso, devido à ausência de dados no Brasil, as poucas empresas que trabalham com ACV tinham que adequar aos seus estudos, dados utilizados em outras regiões, principalmente dos países europeus, reduzindo, conseqüentemente a precisão do estudo. Tais barreiras podem ser minimizadas também com a publicação do SIVC Brasil (MOTTA, 2016).

De acordo com o IBICT (2016), o pensamento do ciclo de vida está se difundindo mundialmente. Embora não seja uma exigência à produção ou comercialização de produtos, há uma série de medidas que vem tornando o estudo de Ciclo de Vida de produtos praticamente indispensável (IBICT, 2016). Como exemplo disso pode-se citar: a nova Política Nacional de Resíduos Sólidos, que objetivando minimizar seus resíduos sólidos e rejeitos gerados, instituiu a responsabilidade compartilhada pelo Ciclo de Vida dos produtos entre todos os envolvidos, desde o fabricante até o serviço de limpeza urbana (BRASIL, 2014). A rotulagem ambiental do tipo III, normatizada pela ISO 14025 (2006), a qual é integralmente baseada na ACV e está sendo um critério marcante no comércio internacional.

### 2.7.3 Avaliação do ciclo de vida aplicado em produtos à base de madeira

Produtos à base de biomassa estão em foco público especial, uma vez que podem substituir muitos produtos de origem fóssil. A demanda mundial por produtos à base de madeira está aumentando e, simultaneamente, as questões relacionadas as consequências ecológicas do uso intensificado da sua matéria-prima vem se tornando cada vez mais importante (SCHULZE et al., 2012). A biomassa é declarada como um produto renovável, todavia, de acordo com Klein et al. (2015) a quantidade de insumos não renováveis no sistema do produto em questão afeta seu grau de renovabilidade. Assim, os encargos ambientais podem surgir durante diferentes etapas de produção de madeira. Por exemplo, o processo de cultivo pode ter uma influência significativa no impacto ambiental desse produto, devido aos processos realizados durante sua cadeia produtiva como fertilização do solo, utilização de máquinas de florestais etc.

No que diz respeito ao setor madeireiro, diversos estudos foram realizados para determinar o desempenho ambiental dos produtos à base de madeira destinados a diferentes utilizações tais como revestimentos de pavimentos (JÖNSSON et al., 1997; NEBEL et al., 2006; PETERSEN; SOLBERG, 2003) caixilhos de janela (RICHTER; GUGERLI, 1996; SALAZAR; SOWLATI, 2008), painéis de fibra de média densidade (*Medium density fiberboard*- MDF) (RIVELA et al., 2007, WILSON, 2010), painéis de fibras de alta densidade (*Hight density fiberboard* - HDF) (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2009a), aglomerados (GARCIA;FREIRE, 2014; SILVA et al., 2014), painéis de fibras orientadas (OSB) (BENETTO et al., 2009; EARLES et al., 2011), madeira laminada com cola (MLC) (PUETTMANN; WILSON, 2004), móveis (GARCÍA et al., 2011a; TAYLOR; VAN LANGENBERG, 2003), polpa de papel (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2009b, GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2011b), montagens de paredes (LIPPKE; EDMONDS, 2006; WERNER, 2001) e materiais de embalagem (FARRENY et al., 2008). Estes estudos objetivaram avaliar o desempenho ambiental geral de diferentes produtos derivados da madeira, bem como identificar os processos ou estágios com maior contribuição para perfis ambientais “hotpots”. No entanto, as diferenças entre os estudos de ACV para produtos derivados da madeira, se referem principalmente à definição dos limites do sistema (do berço ao portão ou do berço ao túmulo), bem como à qualidade dos dados do inventário do ciclo de vida (por exemplo, dados primários ou secundários).

Com relação a trabalhos desenvolvidos no país referentes a análise do desempenho ambiental em painéis compósitos à base de madeira, pode-se dizer que pouco ainda foi abordado sobre o assunto, destacando-se alguns trabalhos. Sartori (2007) realizou uma avaliação comparativa do desempenho ambiental de dois materiais: o painel de madeira e o

painel multilaminar, ambos usados na fabricação de caixas de carga de semi-reboques para o transporte de grãos. O estudo foi desenvolvido com o auxílio do método de ACV com abordagem do portão ao túmulo “*gate to cradle*”, ou seja, o trabalho envolveu apenas as etapas de manufatura, uso e descartes dos painéis. A autora concluiu que os painéis multilaminar apresentaram melhor desempenho em relação aos painéis de madeira, uma vez o primeiro oferece maior durabilidade, implicando um menor número de reposições para cumprir a mesma unidade funcional.

Santos (2010), por intermédio da ACV, fez uma análise comparativa, em escala laboratorial, dos impactos ambientais de painéis reconstituídos fabricados a partir de resíduos e utilizados como forros na construção civil. Os resíduos utilizados na confecção das chapas foram o de bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.); folhas caulinares do bambu (*Dendrocalamus giganteus*); cavacos provenientes do beneficiamento da madeira de *Pinus* (*Pinus elliottii*) e Imbuia (*Ocotea porosa*). A autora concluiu que as chapas de partículas fabricadas com resíduos de cavacos de *Pinus* foram as que apresentaram maior potencial de impacto ambiental devido a fatores como maior distância entre a fonte de origem das matérias-primas e a unidade de produção, maior porcentagem de perdas do resíduo.

Silva (2012) avaliou o ciclo de vida da produção brasileira de painéis de madeira *Medium Density Particleboard* (MDP) e propôs melhorias ambientais para o produto por meio de avaliações de diferentes cenários de produção. Para avaliar os resultados dos potenciais impactos ambientais o autor comparou os métodos CML (2001), EDIP (1997) e USEtox (2008). Os resultados obtidos mostraram que os principais “*hotspots*” relacionados a produção brasileira de MDP foram o alto consumo de óleo BPF (baixo ponto de fluidez) utilizado na planta de energia da fábrica e a resina ureia-formaldeído.

Outro trabalho referente à aplicação da ACV para avaliar o desempenho ambiental de compósitos à base de madeira é de Piekarski (2013). O autor fez uma proposta de melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel MDF, com o auxílio da ACV. Neste estudo, também foram utilizados os métodos CML (2001), EDIP (1997) e USEtox (2008). Os “*hotspots*” identificados foram: consumo de gás natural utilizado na planta térmica, resina UF (ureia-formaldeído), consumo de energia elétrica, consumo de resíduos de madeira na planta térmica, consumo de cavacos de madeira e o transporte dos cavacos de madeira até a fábrica. O autor ainda destaca que a extinção do consumo de gás natural na planta térmica, pode gerar redução de aproximadamente 30% nos impactos potenciais de depleção de recursos abióticos e da camada de ozônio.

Piekarski et al. (2014) também avaliaram o perfil ambiental da produção brasileira do painel de madeira MDF. Essa análise foi realizada em termos de energia, emissões e dependência de fontes renováveis, e foi baseado na metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV). O estudo realizado a partir de uma abordagem portão ao portão (“*gate to gate*”), ou seja, apenas com abrangência “*in loco*” da planta fabril, mostrou que 76% da energia requerida para a produção do MDF é de origem térmica; que o CO<sub>2</sub> é a maior emissão observada durante a produção do painel, sendo o gás natural responsável por 96% dessas emissões de origem fóssil; e por fim, que há baixa dependência de fontes não renováveis quando comparado à literatura na produção brasileira do MDF.

No entanto, não foi encontrado nas bases de dados, como SCIENCE DIRECT, WEB OF SCIENCE, WEB OF KNOWLEDGE etc. trabalho acadêmico relacionado à avaliação do ciclo de vida da produção brasileira de painéis OSB. No âmbito internacional, existem alguns poucos estudos relativos ao desenvolvimento da ACV para OSB. Destacam-se os trabalhos de Chan (2015), que comparou e analisou as emissões e os dados de controle das emissões de OSB e compensados produzidos no Canadá e nos EUA a partir da avaliação do ciclo de vida; Puettmann et al. (2012) que realizaram avaliação do ciclo de vida *cradle-to-gate* para OSB produzidos no Sudeste dos EUA; Benetto et al. (2009) que avaliaram por meio da ACV a melhoria no desempenho ambiental de dois processos de produção de OSB, um utilizando técnica de secagem a vapor (eco dry) e o outro que adota secagem tradicional.

## **2.8 Considerações a respeito da revisão bibliográfica**

Diante do exposto na revisão bibliográfica, observou-se o grande potencial do Brasil como produtor florestal e de painéis compósitos à base de madeira, e além disso, as excelentes perspectivas de crescimento do mercado de OSB para os próximos anos. Aliado a esse crescimento, está também a conscientização da sociedade, do poder público e principalmente das indústrias com questões relacionadas ao desenvolvimento de produtos mais sustentáveis e com maior aplicabilidade. Por essa razão, as pressões em relação as questões ambientais e desenvolvimento sustentável são cada vez mais comum e estão fazendo com que empresas busquem tecnologias mais limpas de forma a serem mais sustentáveis. Neste sentido, a busca e pesquisas com materiais alternativos, que proporcionem menos impactos ambientais, a fim de substituir as matérias-primas comumente utilizadas pelas indústrias, também se faz mais frequente.

Anteriormente também foi destacado o grande volume de madeira removida no primeiro

desbaste (30-50% da quantidade de árvores inicialmente plantadas), que são destinadas principalmente para geração de energia. O potencial ambiental da resina poliuretana à base de óleo de mamona também foi ressaltado, bem como seu excelente desempenho quando aplicada em painéis à base de madeira. Portanto, esses materiais, são excelentes exemplos de insumos alternativos que podem ser utilizados na confecção do painel OSB.

Para a avaliação do desempenho ambiental do painel OSB e dos insumos alternativos supracitado, a ACV se torna uma importante metodologia, pois aborda de maneira holística todo o ciclo de vida (desde a extração da matéria-prima até sua disposição final) de um produto, processo ou serviço, mensura seus impactos ambientais potenciais possibilitando a tomada de decisão no sentido de contribuir com a redução e/ou eliminação desses impactos.

Para o contexto brasileiro, vale destacar que até o momento não há estudos de ACV direcionados para o caso da produção de OSB. Este trabalho tem contornos de originalidade e ganha relevância num cenário de disseminação internacional do emprego desses painéis aliada às responsabilidades ambientais das empresas e às pressões que vêm sofrendo ao longo dos últimos anos.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos itens deste capítulo são apresentados os materiais utilizados, bem como a metodologia adotada na fabricação e caracterização dos OSB. Também estão descritos a metodologia da avaliação do ciclo de vida para os painéis nas duas escalas estudadas: laboratorial e industrial, a descrição dos subsistemas analisados e das categorias de impacto selecionadas etc.

#### 3.1 Materiais utilizados na fabricação dos OSB

Para a fabricação dos OSB foram utilizadas partículas *strands* da madeira de *Pinus* spp. (Figura 11a). A madeira, de densidade aproximada de 450 kg/m<sup>3</sup>, sob a forma de toras com diâmetro entre 5 e 12 cm com casca, era proveniente de primeiro e segundo desbastes e foi fornecida pela Estação Ecológica e Experimental do Instituto Florestal da cidade de Itirapina- SP.

A adesão entre as partículas foi estabelecida por meio da resina poliuretana à base de óleo de mamona (Pu-mamona), fornecida pela empresa KEHL® Indústria e Comércio LTDA. Trata-se de uma resina bicomponente (Figura 11b), com teor de sólidos de 100%, composta pelo polioli com densidade de 1,10 g/cm<sup>3</sup>, componente derivado do óleo vegetal da planta mamona (*Ricinus communis*), e pelo isocianato polifuncional (pré-polímero), com densidade de 1,24 g/cm<sup>3</sup>. A resina poliuretana à base de óleo de mamona foi utilizada no teor de 12%, em relação à massa seca das partículas de madeira. Acrescido do volume que se refere às perdas durante o processo de fabricação dos painéis, conforme experimentação preliminar.

O uso da resina PU- mamona se justifica por seu aspecto ambiental, bem como pelos seus excelentes desempenhos físico e mecânico obtidos em estudos anteriores realizados com compósitos à base de madeira. Estudos de Bertolini et al. (2014), Ferro et al. (2015), Macedo et al. (2016), Nascimento e Morales (2006), Souza et al. (2014), Varanda (2016), entre outros, podem ser destacados em relação ao uso da resina PU-mamona em compósitos à base de madeira, pois todos os autores tiveram resultados de propriedades físicas e mecânicas plenamente satisfatórias para diversas aplicações dos painéis, como em componentes estruturais, móveis, revestimentos, isolamento térmico e acústicos, pisos.

**Figura 11-** Insumos utilizados na fabricação do OSB. a) Partículas de madeira de *Pinus* spp. b) Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona



Fonte: Próprio autor.

### 3.2 Delineamentos experimental

Para este estudo foram estabelecidas 3 condições experimentais, com base nas proporções de polioli e pré-polímero, componentes da resina PU-mamona, como mostra a Tabela 1. Para o estabelecimento das condições experimentais, tomou-se como ponto de partida a proporção de 1:1 entre os componentes polioli (derivado do óleo de mamona) e pré-polímero (isocianato polifuncional) da resina PU-mamona. A adoção deste parâmetro se justifica pelos excelentes resultados obtidos em estudos com OSB e a resina supracitada, como o de Ferro (2013) e Souza (2012), além de pesquisas com outros compósitos à base de madeira, como de Nascimento et al. (2015), Souza et al. (2014) e Varanda (2016).

Com o objetivo de se utilizar maior quantidade do componente da resina proveniente de fontes renováveis (polioli), decidiu-se também adotar duas novas proporções: 1,25:0,75 e 1,50:0,5 (polioli e pré-polímero) entre os componentes da resina, como apresenta a Tabela 1.

**Tabela 1-** Condições experimentais

Condição experimental	Proporção entre os componentes da resina PU-mamona (polioli : pré-polímero)	
	C1	1:1
C2	1,25:0,75	
C3	1,5:0,5	

Os painéis foram produzidos com dimensões de 400 x 400 x 10 mm e densidade nominal

de 0,60 g/cm<sup>3</sup>. Tal densidade foi estipulada de forma a alcançar densidade próxima ao dos OSB produzidos industrialmente no país. Para cada condição experimental, foram produzidas 5 chapas, totalizando 15 painéis. O número de reprodução das chapas foi adotado de forma a reduzir os possíveis erros durante a análise estatística dos resultados.

### 3.3 Produção dos OSB em laboratório

Os procedimentos utilizados na produção laboratorial dos OSB foram baseados nos estudos de Ferro (2013) e Souza (2012), bem como nos procedimentos utilizado pela indústria brasileira para produção do OSB “*home*”. Sendo assim, a produção dos OSB em laboratório foi dividida nas seguintes etapas: geração de partículas, aplicação da resina, formação do colchão de partículas, pré-prensagem e prensagem do colchão de partículas, e esquadreamento dos painéis.

Os painéis foram produzidos no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP).

#### 3.3.1 Geração das partículas

Primeiramente, os toretes de madeira com diâmetros entre 5 cm e 12 cm, tiveram suas cascas removidas e, em seguida, em uma serra circular, foram seccionadas em peças com 90 mm de comprimento, e em uma serra fita horizontal reduziu-se a espessura dessas peças a aproximadamente 40 mm. Tais dimensões definiram o comprimento e a largura das partículas *strands*, respectivamente. Devido ao diâmetro reduzido de algumas toras provenientes de desbaste, delas não foi possível obter a largura de 40 mm da peça, portanto algumas partículas geradas apresentaram menores dimensões em relação à largura.

As peças foram encaminhadas a um picador de disco, cujas facas foram ajustadas para gerar partículas com espessura nominal de 0,7 mm. A adoção das dimensões das partículas geradas se justifica pelos excelentes desempenhos físico e mecânico apresentados em pesquisas com OSB desenvolvidas no LaMEM SET (FERRO et al., 2015; MACEDO et al., 2016; NASCIMENTO et al., 2015; SOUZA, 2012).

Depois de obtidas, as partículas foram secas ao ambiente, até atingirem teor de umidade entre 10 e 12%, recomendado pelo fabricante da resina poliuretana à base de óleo de mamona para boa colagem das partículas.

### 3.3.2 Aplicação das resinas

Primeiramente, as partículas e os adesivos foram pesados em quantidades específicas, de acordo com cada condição experimental. O adesivo poliuretano à base de óleo de mamona do tipo bicomponente foi preparado, e as proporções utilizadas entre seus componentes, poliol e o pré-polímero, foram apresentadas na Tabela 1.

No interior de uma encoladeira adaptada, tipo tambor giratório, as partículas *strands* foram adicionadas e o adesivo foi pulverizado com o auxílio de um compressor de ar e uma pistola de ar comprimido. Para adequada homogeneização dos materiais, as partículas encoladas permaneceram no tambor giratório por 5 minutos. O tempo utilizado para a homogeneização da resina e partículas foi verificado e utilizado por outros autores na produção de painéis compósitos à base de madeira como: Bertolini (2011), Ferro (2013), Nascimento et al. (2015), Souza (2012) e Varanda (2016).

### 3.3.3 Formação do colchão de partículas

Todos os painéis foram produzidos com três camadas. As partículas das camadas externas foram orientadas e as partículas da camada interna foram dispostas perpendicularmente as partículas das camadas externas. A composição do painel em relação à quantidade de partículas nas camadas superficiais e camada interna (face/miolo/face) foi 20:60:20, com base na massa de partículas encoladas. Tal parâmetro foi baseado nos estudos realizados por Cloutier (1998), Ferro (2013) e Souza (2012), que obtiveram excelentes desempenhos dos OSB nessas condições. Além disso, a indústria brasileira utiliza tal composição na fabricação do OSB do tipo “home”.

Para a orientação das partículas, foi utilizado um orientador, equipamento composto por oito lâminas, com função de separar e direcionar as partículas. A Figura 12 mostra o orientador de partículas utilizado para fabricação dos OSB laboratorial.

**Figura 12-** Orientador de partículas para fabricação de OSB



Fonte: Próprio autor.

### **3.3.4 Pré-prensagem e prensagem do colchão de partículas**

Após a formação do colchão de partículas, este foi submetido à pré-prensagem, realizada em prensa mecânica. Este processo visa melhorar a conformação do colchão, além de reduzir a perda de partículas. A pressão aplicada na pré-prensagem foi de 0,01 MPa.

Na sequência, o colchão de partículas pré-conformado foi encaminhado à prensa hidráulica. As condições de prensagem empregadas foram: tempo de 10 minutos, pressão de 4 MPa e temperatura de 100° C. A adoção de tais parâmetros também se justifica devido aos altos valores das propriedades obtidas em estudos anteriores com painéis compósitos à base de madeira (FERRO et al., 2015; MACEDO et al., 2016; NASCIMENTO et al., 2015; SOUZA, 2012).

Para estabilização e completa cura do adesivo, após a prensagem os painéis foram acondicionados à temperatura ambiente por 48 horas.

### **3.3.5 Esquadreamento dos painéis**

Após o período de acondicionamento, os painéis foram esquadrejados, em serra circular. De cada uma das extremidades do painel, foram removidos 25 mm, a fim de se eliminarem efeitos de borda. Portanto, o OSB ficou com dimensões finais de 350 x 350 x 10 mm.

Algumas das etapas descritas de fabricação dos OSB estão apresentadas na Figura 13.

**Figura 13-** Etapas do processo produtivo dos OSB. a) Remoção das cascas dos toretes; b) Corte dos torestes; c) Cortes das peças; d) Geração das partículas; e) Aplicação da resina; f) Orientação das partículas das camadas externas; g) Orientação das partículas das camadas internas; h) Colchão de partículas; i) Pré-prensagem do colchão; j) Prensagem a quente; k) Esquadrejamento do painel; l) OSB



Fonte: Próprio autor.

### 3.4 Caracterização dos OSB

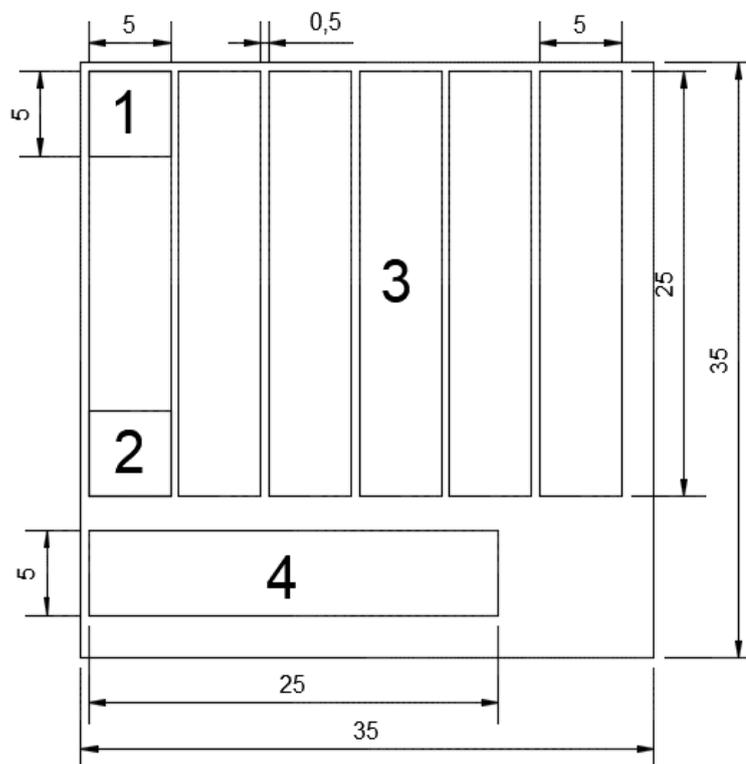
A seguir estão descritos os tipos de ensaios, bem como seus procedimentos para caracterização dos OSB produzidos em laboratório.

#### 3.4.1 Obtenção dos corpos de prova

Para realização dos ensaios, foram obtidos corpos de prova de cada um dos 15 painéis produzidos. De cada um, foram retirados primeiramente os corpos de prova para os ensaios mecânicos de flexão estática, paralela ao sentido de orientação das partículas, e de arrancamento de parafuso (face e topo). Esses corpos de prova depois de ensaiados deram origem aos corpos de prova para determinação das propriedades absorção de água e inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água, densidade, teor de umidade e adesão interna. Todavia, é importante ressaltar que tais amostras foram retiradas das regiões não danificadas dos corpos de prova ensaiados na flexão estática.

O esquema de retirada dos corpos de prova de cada painel está apresentado na Figura 14.

**Figura 14-** Esquema de retirada dos corpos de prova de um painel



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 2 apresenta os ensaios realizados para caracterização dos OSB produzidos, as normas seguidas para realização de cada ensaio e a quantidade de corpos de prova (CP) retirados de cada painel.

**Tabela 2-** Quantidade de corpos de prova e normas utilizadas para ensaios de caracterização

<b>Propriedades</b>	<b>Siglas adotadas</b>	<b>Normas utilizadas</b>	<b>CP/painel</b>	<b>Nº do CP na Figura 13</b>	<b>Total de CPs/tratamento</b>
Módulo de elasticidade paralelo	MOEpa	EN 310, 1993	6	3	30
Módulo de elasticidade perpendicular	MOEpe	EN 310, 1993	1	4	5
Módulo de ruptura paralelo	MORpa	EN 310, 1993	6	3	30
Módulo de ruptura perpendicular	MORpe	EN 310, 1993	1	4	5
Adesão interna	AI	EN 319, 1993	6	1/2	30
Absorção de água em 2h	A2h	EN 317, 1993	6	1/2	30
Absorção de água em 24h	A24h	EN 317, 1993	6	1/2	30
Inchamento em espessura em 2h	I2h	EN 317, 1993	6	1/2	30
Inchamento em espessura em 24h	I24h	EN 317, 1993	6	1/2	30
Densidade aparente	D	EN 323, 1993	6	1/2	30
Teor de umidade	TU	EN 322, 1993	6	1/2	30

É importante destacar que, para a determinação da propriedade MOEpe e MORpe, foram extraídos apenas um corpo de prova por painel fabricado. Por não ser uma propriedade determinante para a classificação do OSB, optou-se extrair menor quantidade de corpos de prova. Esse procedimento foi também realizado por autores como Ferro (2013), Souza (2012) e Surdi (2012).

### 3.4.2 Propriedades físicas e mecânicas dos OSB

A avaliação dos desempenhos físico e mecânico dos painéis produzidos foi baseada nas recomendações da norma europeia EN 300 (2006) - *Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specifications*, e outras normas específicas, como apresentado na Tabela 2, às quais a EN 300 faz referência. As normas europeias supracitadas serão utilizadas devido à ausência de documentos normativos brasileiros específicos para este produto.

As propriedades físicas determinadas foram densidade, teor de umidade, inchamento em espessura e absorção de água após 2 e 24 horas de imersão. Com relação às propriedades mecânicas, determinaram-se o módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) no sentido paralelo e perpendicular à orientação das partículas *strands*, na flexão estática, e a resistência à tração perpendicular às faces. A metodologia para realização destes ensaios físicos e mecânicos está detalhada a seguir.

#### 3.4.2.1 Teor de umidade e densidade

Para determinação do teor de umidade dos painéis, os corpos de prova de dimensões nominais 50 x 50 mm foram pesados em uma balança analítica com precisão 0,01g, para obtenção da sua massa inicial (massa úmida). Em seguida, foram secos em estufa com circulação forçada de ar, a  $105 \pm 3^\circ \text{C}$ , e pesados a cada hora até atingir massa constante, obtendo-se a massa seca.

Conhecida a massa seca dos corpos de prova, o teor de umidade dos painéis foi determinado através da Equação 1.

$$TU = \frac{MU - MS}{MS} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

TU – Teor de umidade do corpo de prova (%);

MU – Massa úmida (g);

MS – Massa seca (g).

Para a determinação da densidade, os mesmos corpos de prova utilizados na determinação do teor de umidade foram medidos com auxílio de um paquímetro digital. A partir

da relação massa/volume, determinou-se a densidade dos painéis.

### 3.4.2.2 Inchamento em espessura e absorção de água

Para determinação das propriedades inchamento em espessura e absorção de água, foram obtidos corpos de prova com dimensões nominais de 50 x 50 x 10 mm. Primeiramente, as amostras foram medidas em relação à sua espessura com paquímetro digital (Figura 15a), e em seguida, pesadas antes e após imersão em água com temperatura aproximada de 20°C, por períodos de 2 e 24h (Figura 15b).

**Figura 15-** Ensaio de inchamento em espessura e absorção de água. a) Medição do corpo de prova com o paquímetro digital. b) Pesagem do corpo de prova na balança digital



(a)



(b)

Fonte: próprio autor.

Os valores de inchamento em espessura e absorção de água após 2 e 24h de imersão, foram obtidos com as Equações 2 e 3.

$$IE = \frac{E_f - E_i}{E_i} \quad (2)$$

Onde:

IE – Inchamento em espessura (%);

$E_f$  – Espessura do corpo de prova após imersão em água (mm);

$E_i$  – Espessura do corpo de prova antes da imersão em água (mm).

$$AA = \frac{M_f - M_i}{M_i} \quad (3)$$

Onde:

AA – Absorção de água (%);

$M_f$  – Massa do corpo de prova após imersão em água (g);

$M_i$  – Massa do corpo de prova antes de imersão em água (g).

### 3.4.2.3 Flexão estática

Por intermédio do ensaio de flexão estática, foram determinadas as propriedades módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) dos corpos de prova, na direção paralela à orientação das partículas da face. Os corpos de prova obedeceram às dimensões nominais de 250 x 50 mm e tiveram suas dimensões aferidas em três pontos. Os valores médios obtidos foram tomados como a dimensão efetiva do corpo de prova. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios da EMIC, com capacidade de 30 kN, como apresenta a Figura 16.

**Figura 16-** Ensaio de flexão estática



Fonte: Próprio autor.

Para determinação do módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR), foram utilizadas as equações 4 e 5, respectivamente.

$$MOE = \frac{L^3 \times (F_2 - F_1)}{4 \times b \times t^3 \times (a_2 - a_1)} \quad (4)$$

Onde:

MOE – Módulo de elasticidade (MPa);

L– Distância entre os apoios (mm);

F<sub>1</sub> e F<sub>2</sub> – São aproximadamente 10 e 40% da força máxima, respectivamente, no limite de proporcionalidade, expressa em Newtons (N);

b – Largura do corpo de prova (mm);

t – Espessura do corpo de prova (mm);

a<sub>2</sub> e a<sub>1</sub> – São as deflexões correspondentes a F<sub>2</sub> e F<sub>1</sub>, respectivamente, medidas no ponto médio do vão do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

$$MOR = \frac{3 \times F_{max} \times L}{2 \times b \times t^2} \quad (5)$$

Onde:

MOR – Módulo de ruptura (MPa);

F<sub>max</sub> – Máxima força (ruptura) (N);

L – Distância entre os apoios (mm);

b – Largura do corpo de prova (mm);

t – Espessura do corpo de prova (mm).

#### 3.4.2.4 Tração perpendicular às faces

O ensaio de tração perpendicular às faces permite a determinação da adesão interna (ou resistência a tração perpendicular às faces). Para realização de tal ensaio, utilizou-se corpo de prova de 50 x 50 mm. Com o auxílio de um paquímetro, os lados da amostra foram medidos, a fim de se obter sua real área.

Para execução do ensaio, é necessário que os corpos de prova sejam aderidos em suportes de aço. Essa adesão foi realizada com adesivo Epóxi Araldite® do tipo bicomponente, na proporção

de 1:1 entre resina e endurecedor, conforme indicação do fabricante. Dessa forma, garante-se que a ruptura ocorra no corpo de prova e não na linha de cola entre a amostra e o suporte de aço.

O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios da marca AMSLER, com capacidade de 250 kN, como mostra a Figura 17.

**Figura 17-** Ensaio de tração perpendicular às faces



Fonte: Próprio autor.

A resistência à tração perpendicular às faces dos corpos de prova foi determinada de acordo com a equação 6.

$$TP = \frac{P}{S} \quad (6)$$

Onde:

TP – Tração perpendicular (MPa);

P – Carga de ruptura (N);

S – Área real do corpo de prova (mm<sup>2</sup>).

### 3.4.3 Análise estatística

A análise de variância (ANOVA) de Kruskal-Wallis, ao nível de 5% de significância ( $\alpha$ ) foi utilizada para investigar a influência dos teores de polioliol (1; 1,25; 1,50) nas propriedades

físicas e mecânicas dos painéis fabricados. Da ANOVA, a hipótese nula ( $H_0$ ) consistiu na equivalência das médias dos três tratamentos, e a não equivalência de pelo menos duas médias como hipótese alternativa ( $H_1$ ). Dessa forma, p-valor (Probabilidade p) maior ou igual a 5% implica que as médias dos três tratamentos são equivalentes, e não equivalentes (entre duas pelo menos) em caso contrário. Acusada a significância dos teores para uma certa propriedade, o teste de comparações de Student-Newman-Keuls foi utilizado para o agrupamento dos respectivos níveis.

Como comentado, as propriedades físicas dos painéis fabricados consistiram no inchamento em espessura após 2 (I2h) e 24 horas (I24h) e na absorção de água após 2 (A2h) e 24 horas (A24h), e as propriedades mecânicas avaliadas foram a adesão interna (AI), módulo de elasticidade (MOEpa) e a resistência (MORpa) na flexão estática na direção paralela e módulo de elasticidade (MOEpe) e a resistência (MORpe) na flexão estática na direção perpendicular.

Para a análise do MOEpe e do MORpe foram obtidas 5 determinações por tratamento, sendo 30 determinações para cada propriedade e para cada teor de polioliol, resultando em 660 experimentações.

### **3.5 Avaliação do ciclo de vida (ACV)**

A avaliação do ciclo de vida (ACV) foi realizada para os OSB tipo “home”, produzidos industrialmente, e para os painéis produzidos em escala laboratorial, no LaMEM. A indústria fabrica treze tipos de OSB, os quais se diferenciam em relação a resina utilizada e, conseqüentemente, ao tipo de emprego do painel. Dentre esses produtos, foi selecionado o OSB do tipo “home”, o qual apresenta desempenho físico e mecânico para ser aplicado em diversos setores da construção civil.

A ACV foi desenvolvida com base nas recomendações das normas ABNT NBR ISO 14040 (2009) e ABNT NBR ISO 14044 (2009). De acordo com esses documentos normativos, a estrutura metodológica para o desenvolvimento da ACV para um produto, consiste de quatro fases, definição de objetivo e escopo, análise de inventário do ciclo de vida, avaliação de impacto e interpretação.

Cabe ressaltar que o inventário do ciclo de vida (ICV), fase inicial da ACV na qual os dados são coletados, foi realizado no Brasil. As fases de Avaliação de impacto e interpretação foram realizadas na Espanha, na Universidade de Santiago de Compostela, em Santiago de Compostela, no Grupo de Engenharia Ambiental e Bioprocessos (Biogroup).

### 3.5.1 Definição de objetivo e escopo

A definição do objetivo e escopo consiste na primeira fase para o desenvolvimento de um estudo de ACV.

O objetivo da ACV foi definido de forma a atender os interesses da indústria e da academia. Para a indústria, a fim de identificar onde podem ocorrer os principais impactos relacionados a produção do OSB e, dessa forma, poder

Dentre os itens do escopo estabelecido pelas normas brasileiras ABNT NBR 14040 (2009) e 14044 (2009), foram detalhados neste estudo a unidade funcional e o fluxo de referência a ser estudo, descrição do sistema do produto e fronteira dos sistemas, procedimentos de alocação, descrição dos requisitos na qualidade dos dados, metodologia de AICV e categorias de impacto, interpretação e pressupostos e limitações.

#### 3.5.1.1 Unidade funcional e fluxo de referência

A unidade funcional deve ser definida com base na função com que o produto se propõe a cumprir, pois ela estabelece uma base de referência em relação à qual os dados de entrada e saída inventariados são normalizados num sentido matemático (ISO, 2006; SILVA, 2012). Com relação ao fluxo de referência, este mede a quantidade do produto necessário para cumprir a função expressa pela unidade funcional.

Como a função do OSB depende principalmente do tipo de resina empregada, e sua utilização pode envolver diversas áreas como moveleira, estrutural, decoração, este trabalho não contempla estudos de casos com os detalhes relacionados ao uso do painel, limitando-se a uma ACV do tipo *cradle-to-gate*. Sendo assim, a unidade funcional se mostrou equivalente ao fluxo de referência.

#### 3.5.1.2 Descrição do sistema de produto e fronteira dos sistemas

De acordo com a ABNT NBR ISO 14044 (2009), sistemas de produto são compostos por processos elementares, ou seja, menor elemento considerado na análise do inventário do ciclo de vida para o qual dados de entradas e saídas do sistema são quantificados. Para melhor compreensão deste estudo, os sistemas de produtos foram divididos em dois subsistemas: Operações florestais (OF) e Operações de produção do painel (OPP). Ainda, esses subsistemas foram definidos para ambas as escalas de produção estudadas, laboratorial e industrial.

Em relação ao subsistema OF, foram consideradas e analisadas detalhadamente todas as atividades realizadas na floresta destina à produção da madeira de *Pinus*, principal matéria-prima utilizada na fabricação do painel. Para a escala industrial, denominado OF<sub>i</sub>, foi considerado o plantio de árvores feito exclusivamente para obtenção de madeira para fabricação de OSB. Tal plantio possui duração média de vida de 12 anos e após esse período é feito o corte raso das árvores, as quais são destinadas à fabricação de painel. Para a escala laboratorial (OF<sub>l</sub>) foi considerado o uso da madeira proveniente de desbaste. Como já mencionado, tal madeira é resultante do manejo empregado em um reflorestamento realizado para obtenção de toras grandes diâmetros, pois o objetivo é atender as necessidades de serrarias e laminadoras. Nesse tipo de plantio a duração média de vida é de 20 anos, sendo os desbastes realizados aos 4 e aos 12 anos de idade.

As atividades relacionadas às operações florestais foram classificadas em cinco etapas principais, preparação do solo, plantio de mudas, manejo florestal, colheita florestal e estabelecimento de infraestrutura. Para a OF na escala laboratorial, além das cinco etapas mencionadas, considerou-se também a realização de desbastes.

No que consiste ao subsistema de operação de produção de painel, foram incluídas todas as atividades realizadas para a produção do OSB na indústria e no laboratório, detalhadas, respectivamente, nos itens 2.5.1 e 3.3.

Pode-se dizer que a principal diferença no processo produtivo entre ambas as escalas está na classificação das partículas, pois na fabricação do painel em laboratório as partículas não passam por uma classificação, para minimizar a quantidade de finos. Ainda, na escala industrial há o processo de geração de calor, onde resíduos de biomassa (cascas, finos, resíduos de corte etc.) são queimados para gerar calor, o qual é utilizado na secagem das partículas e no aquecimento do óleo utilizado na prensa. Por fim, em relação às diferenças dos insumos utilizados nas escalas de produção, pode-se dizer que no laboratório utiliza-se apenas a resina poliuretana à base de óleo de mamona, enquanto que na indústria, além da resina MDI, também são acrescentados ao painel a parafina, para melhorar a higroscopicidade e o inseticida à base de piretróide, com a finalidade de aumentar à resistência do painel ao ataque de organismos deteriorares.

A fronteira (ou limites) dos sistemas é utilizada para estabelecer as etapas a serem incluídas ou excluídas no estudo de ACV e devem ser realizadas de acordo com os objetivos estabelecidos (ABNT NBR ISO 14040, 2009; SILVA, 2012). Segundo Tillman e Baumann (1995), as fronteiras do sistema de produto são: fronteiras em relação ao sistema natural; fronteiras em relação a outros sistemas, fronteira geográfica, fronteira temporal e fronteira tecnológica.

Fronteira geográfica: Define onde será considerada a realização de cada processo, uma vez

que realidades físicas como clima e relevo podem afetar os resultados de uma ACV. Considerando que cada etapa pode ocorrer em diferentes localidades, com tecnologias e sensibilidade do meio ambiente aos diversos poluentes específicos para aquela região, se torna muito importante analisar os aspectos geográficos (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Fronteira temporal: Considera o período para o qual os dados levantados terão validade, pois as práticas industriais, aspectos de regulamentações e legislação, variam com o passar do tempo (SILVA, 2012). Para a definição do escopo temporal foram consultados gestores internos (através de entrevistas) da empresa com relação às expectativas de mudança de tecnologia e insumos (resina e novos gêneros de madeira) utilizados na fabricação desses produtos.

Fronteira tecnológicas: As fronteiras tecnológicas deste estudo referentes à produção industrial possuem similaridade com as atividades empregadas mundialmente para a fabricação de OSB. Os aspectos observados na empresa pesquisada, como tecnologia, sequência de equipamentos e produção, possuem similaridades com as técnicas descritas na literatura (ALBUQUERQUE e MENDES, 2000; CLOUTIER, 1998; IWAKIRI, 2005). No que concerne às fronteiras tecnológicas referentes à escala laboratorial, há também similaridades com o estado da arte tecnológico mundial adotado na fabricação de OSB, pois a metodologia empregada é baseada nos procedimentos de produção descritos na literatura nacional e internacional.

### 3.5.1.3 Procedimentos de alocação

Alocação é uma das questões mais críticas em estudos de ACV. São procedimentos empregados em sistemas multifuncionais, que apresentam mais de um produto como saída principal. Consistem em métodos de repartição de responsabilidade dos impactos ambientais entre os diversos produtos, materiais ou processos, que se faz necessária devido à variedade de componentes que estão entrando e saindo de um sistema (GONZÁLEZ-GARCIA, 2014; MORETTI, 2011; SILVA, 2012; UGAYA, 2001).

A ABNT NBR ISO 14044 (2009) recomenda que a alocação seja evitada sempre que possível. Porém, quando for necessário empregá-la, convém que as entradas e saídas do sistema sejam subdivididas entre seus diferentes produtos ou funções, de modo a refletir as relações físicas subjacentes entre eles. Ainda, a norma estabelece que a alocação seja realizada com base nas propriedades físicas do produto (por exemplo, massa) ou valor econômico (valor de mercado dos produtos).

#### 3.5.1.4 Requisitos na qualidade dos dados

A qualidade dos dados do Inventário de ciclo de vida (ICV) geridos é uma questão importante a ser abordada em um estudo de ACV (ABNT NBR ISO 14040, 2009). Devem ser considerados dados primários reais e característicos para obter resultados ambientais representativos. Neste estudo, apenas os dados primários foram obtidos para o “*foreground system*”, ou seja, os dados referentes aos subsistemas de OF e OPP.

Para a escala industrial os dados de produção referentes aos subsistemas OF e OPP, bem como distâncias médias de transporte dos insumos, foram obtidos com funcionários das empresas produtoras de *Pinus* e de OSB, respectivamente. Para o “*background system*”, os dados de inventário foram coletados da literatura, ou seja, dados relacionados à produção de químicos requeridos em ambos subsistemas, OF e OPP, bem como referentes à produção de eletricidade brasileira e combustíveis fósseis. No que se refere às saídas para o ambiente, derivadas de atividades relacionadas à ambos os subsistemas de operação, foram considerados dados primários e, quando estes não estavam disponíveis, tais dados foram estimados com base na literatura.

No que concerne à escala laboratorial, os dados de inventário foram determinados por meio de medição “*in loco*”. Os dados de entradas no subsistema foram coletados por intermédio de balança de massa. Neste caso, tudo que entrou no sistema (matéria-prima e insumos) e tudo que saiu (produtos e resíduos) foram convertidos em massa e mensurados. Além disso, o consumo de energia elétrica de cada equipamento utilizado no laboratório também foi determinado. Para o “*background system*” do subsistema OPP<sub>i</sub>, os dados de inventário também foram coletados da literatura, bem como as saídas para o ambiente, derivadas das atividades de produção do painel.

Para a resina PU-mamona, a empresa produtora, não revelou os insumos, procedimentos realizados, e resíduos gerados para produzir tal resina. Sendo assim, foi impossível realizar o ICV e calcular os impactos ambientais potenciais referentes à produção de parte da resina, o polioli, componente derivado do óleo de mamona.

#### 3.5.1.5 Categorias de impacto, método de avaliação de impacto

Após a realização do inventário do ciclo de vida (ICV) é necessário definir as categorias de impacto, o(s) método(s) de AICV. As categorias de impactos, particular de cada estudo de ACV, é a classe que representa as questões ambientais relevantes às quais os resultados da análise do inventário podem ser associados (RIBEIRO, 2009). Em geral, esse processo envolve associar dados de inventário com categorias de impacto específicas e indicadores de categoria,

tentando dessa forma entender tais impactos. A fase de AICV também fornece informações para a fase de interpretação do ciclo de vida.

Antes da escolha do método de avaliação a ser utilizado neste estudo, foi realizado um levantamento dos principais métodos utilizados em estudos científicos nacionais e internacionais para compósitos à base de madeira e produções florestais. A Tabela 3, mostra alguns dos principais estudos de ACV e seus respectivos métodos de avaliação dos impactos ambientais.

**Tabela 3-** Métodos de AICV utilizados em estudos para compósitos à base de madeira e produção florestal

Referências	Objetivo dos estudos	Método de AICV empregado
Athena Sustainable Materials Institute (2009)	ACV para MDF canadense	LUCAS e TRACI
Benetto et al. (2009)	Avaliação do ciclo de vida de painéis (OSB): da inovação de processos ao ecodesign	Impact2002+/ Eco-indicator
Dias e Arroja (2012)	Impactos ambientais da produção florestal de <i>Eucalyptus</i> e <i>Pinus</i> em Portugal	CML
Garcia (2010)	Painel aglomerado	CML
Garcia e Freire (2012)	Análise da influência do mix de matéria-prima e do fim de vida na Avaliação do ciclo de vida de painéis à base de madeira	ReCiPe
González-Garcia et al. (2009)	Avaliação do desempenho ambiental da produção de painel HDF	CML
González-Garcia et al. (2013a)	Inventário do ciclo de vida e desempenho ambiental da produção de Douglas-fir	ReCiPe
González-Garcia et al. (2013b)	Influência do manejo florestal de Douglas-fir	ReCiPe
Michelsen et al. (2008)	Impactos ambientais de operações florestais	CML
Neupane et al. (2011)	Impactos ambientais de partículas de madeira	Eco-indicator
Oneil et al. (2010)	Impactos do ciclo de vida de recursos florestais	Eco-indicator
Rivela et al. (2006)	Inventário do ciclo de vida para painéis MDP	Eco-indicator
Rivela et al. (2007)	Inventário do ciclo de vida para MDF	Eco-indicatr
Santos (2010)	ACV para produção laboratorial de aglomerado	EDIP
Silva (2012)	Avaliação do ciclo de vida para produção brasileira de MDP	CML/EDIP/USEtox
Piekarski (2013)	Análise do perfil ambiental da produção brasileira de MDF	CML/EDIP/USEtox
Puettmann et al. (2013)	Inventário do ciclo de vida para produção de OSB para região Sudeste dos Estados Unidos	TRACI

Observa-se na Tabela 3, que os principais métodos utilizados na fase de AICV de estudos nos quais foram realizados uma ACV para painéis compósitos à base de madeira e para operações florestais foram os CML, Eco-indicator e ReCiPe.

O método ReCiPe é uma continuação dos métodos Eco-indicator 99 e CML 2002, e combina a simples interpretação dos resultados do Eco-indicator 99 com o rigor científico do CML (GOEDKOOPE et al., 2009). Ademais, o método ReCiPe é tecnicamente comprovado e internacionalmente aceito na condução de estudos de ACV, além de abranger 18 categorias de impacto relacionadas ao tipo de abordagem “*midpoint*” e 3 categorias de impacto relacionadas ao tipo de abordagem “*Endpoint*”. Por esses motivos, a avaliação dos impactos ambientais associados aos sistemas de produção de OSB proposto (escala industrial e laboratorial) foi realizada considerando os fatores de caracterização reportados pelo método ReCiPe com abordagem do tipo “*midpoint*” (GOEDKOOPE et al., 2009).

Em uma abordagem do tipo “*midpoint*”, todas as substâncias referentes ao ICV são adequadamente agregadas em categorias de impacto de acordo com uma característica comum na cadeia de causa efeito do mecanismo ambiental. Estas características não representam as consequências finais sobre o percurso ambiental das emissões listadas no (ICV), mas são indicadores de impacto em potencial como: acidificação, diminuição da camada de ozônio, aquecimento global, ecotoxicidade, etc. (ALVARENGA, 2010; CAVALETT et al., 2012; JOSA et al., 2007; SHARAAI et al., 2014). Já uma metodologia do tipo *endpoint*, refere-se ao indicador de categoria onde os aspectos ambientais provenientes do ICV são diretamente correlacionados aos danos finais, como por exemplo: saúde humana, qualidade do ambiente natural, recursos naturais e do meio ambiente (PENNINGTON, 2004; SHARAAI et al., 2014; SILVA, 2012). Em geral, a definição de um indicador próximo da intervenção ambiental (*midpoint*), resulta numa modelação mais precisa mas tornará o indicador ambientalmente menos relevante. Pelo contrário, quanto mais perto do *endpoint* estiver o indicador, maior relevância ambiental terá, mas menor será a sua precisão em termos de intervenção (UDO de HAES et al., 1999).

Com base nos estudos de ACV para compósitos à base de madeira e operações florestais, apresentados na Tabela 3, dez categorias de impacto foram selecionadas para avaliação, sendo elas: Mudança climática (MC), Depleção da camada de ozônio (DO) Acidificação terrestre (AT), Eutrofização de água doce (EA), Eutrofização marinha (EM), Toxicidade humana (TH), Formação de oxidantes fotoquímicos (FOF), Ecotoxicidade terrestre (ET), Ecotoxicidade de água doce (ETa), Depleção fóssil (DF). O software SimaPro v. 8.0.5.3 (PRE-SUSTAINABILITY, 2012) foi utilizado para implementar e gerenciar os dados de ACV. Cada categoria de impacto selecionada para este estudo está brevemente descrita a seguir, e, além disso, estão apresentados os principais aspectos ambientais relacionado a cada categoria de impacto.

- Mudança climática (MC)

As alterações climáticas causam uma série de mecanismos ambientais que afetam tanto a saúde humana como a saúde do ecossistema. Os modelos de alterações climáticas são, em geral, desenvolvidos para avaliar o impacto ambiental futuro de diferentes cenários políticos. O método ReCiPe avalia o efeito marginal da emissão de gases CO<sub>2</sub> ou outros gases de efeito estufa (GOEDKOOOP; SPRIENSMA, 1999). O indicador de categoria de impacto na abordagem do tipo “*midpoint*” é o forçamento radiativo infravermelho, expresso em CO<sub>2</sub> equivalentes (kg de CO<sub>2</sub>-eq./ kg de emissão).

Para este trabalho, os aspectos ambientais relacionados a categoria de impacto (MC) são os gases provenientes da produção da resina MDI, emissão de gases devido ao uso de combustível fóssil (diesel) nos subsistemas OF e OPP (escala industrial), produção de fertilizantes utilizados no subsistema OF.

- Depleção da camada de ozônio (DO)

Refere-se à redução da camada de ozônio (O<sub>3</sub>) na estratosfera, provocada por emissões de substâncias como o clorofluorocarbonetos (CFC) e átomos de bromo presentes nos hálons (clorofluorocarbonetos bromados). O ozônio estratosférico é vital para a vida por impedir a radiação UV-B ultravioleta solar nociva. Tal radiação pode aumentar o risco para a saúde humana (câncer de pele e catarata) se o corpo e os olhos não estiverem devidamente protegidos por roupas ou outras precauções. Pode também causar envelhecimento prematuro e supressão do sistema imunológico e pode danificar a vida vegetal terrestre e os ecossistemas aquáticos (FAHEY et al., 2001).

Neste trabalho, os aspectos ambientais referidos a essa categoria de impacto são gases emitidos na produção dos químicos (termicida piretróide, parafina e MDI), emissões devidas à utilização do diesel nos subsistemas OF e OPP, e emissões devidas à produção da energia elétrica.

- Acidificação terrestre (AT)

A deposição atmosférica de substâncias inorgânicas, tais como sulfatos, nitratos e fosfatos, causa uma alteração na acidez do solo. Para quase todas as espécies de plantas, existe um grau ideal de acidez claramente definido. Uma grande mudança nos níveis de acidez é prejudicial para espécies específicas, e esse acontecimento é referido como acidificação. Como

resultado, ocorrerão mudanças na ocorrência de espécies (GOEDKOOOP; SPRIENSMA, 1999, HAYASHI et al., 2004). As principais emissões acidificantes são  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  e  $\text{SO}_2$  (HAES, U. et al., 2002, HAYASHI et al., 2004).

Neste estudo, dentre os aspectos que podem contribuir significativamente para essa categoria de impacto estão a emissão de COV's durante a queima de biomassa no subsistema OPP. Além disso, na produção da resina MDI e do pré-polímero (componente da resina PU-mamona) há emissões de gases que também contribuem com essa categoria de impacto.

- Eutrofização aquática (EA)

A eutrofização aquática é o enriquecimento de nutrientes do meio aquático, especialmente a partir de substâncias à base de nitrogênio ou fósforo. Na água, a eutrofização pode proporcionar diminuição na concentração de oxigênio dissolvido, afetando diversos organismos, e como resultado disso, pode afetar os ecossistemas. Para o método ReCiPe, a unidade de referência para a eutrofização de água doce é dada em fósforo (P), ou seja, em kg de P-eq/kg de emissão. Para a categoria de impacto eutrofização marinha, a unidade de referência é dada em Nitrogênio (N), ou seja, em de N-eq/kg de emissão. Neste estudo foram selecionadas ambas as categorias de impactos mencionadas referentes a eutrofização aquática.

Com relação à eutrofização de água doce, os aspectos que mais podem contribuir com essa categoria de impacto são as emissões devidas à produção dos químicos (parafina e termicida piretróide), relacionadas ao subsistema OPP. Para o subsistema OF, o uso de fertilizantes à base de fósforo, como superfosfato, contribui significativamente. Em referência à eutrofização marinha, os aspectos que podem contribuir são relativos às emissões provenientes da queima de biomassa para gerar energia no subsistema OPP, bem como às emissões referentes a produção da resina MDI e do pré-polímero (componente da resina PU-mamona).

- Toxicidade humana (TH)

Segundo Chehebe (1997), a toxicidade humana é ocasionada pelas atividades antrópicas que emitem substâncias tóxicas através do ar, água ou solo, e causam problemas à saúde humana. A toxicidade é frequentemente causada por substâncias que apresentam baixo grau de degradabilidade no ambiente e, portanto, que permanecem por um período de tempo longo após a emissão, além disso, algumas substâncias tendem a se acumular nos organismos vivos que servem de alimento para o homem. O método ReCiPe assume que, para essa categoria de impacto, seja adotada a unidade de

referência diclorobenzeno (1,4 DB) equivalente, em kg de 1,4-DB eq/ kg de emissão.

Neste estudo, os aspectos que podem contribuir para a categoria de TH se relacionam às emissões provenientes da produção dos químicos (termicida piretróide, parafina, resina MDI e o componente pré-polímero da resina PU-mamona) utilizados no subsistema OPP. A aplicação dos pesticidas no solo, no subsistema OF, também pode contribuir para essa categoria de impacto.

- Formação de oxidantes fotoquímicos (FOF)

Oxidantes fotoquímicos são poluentes secundários formados a partir da reação de óxidos de nitrogênio com substâncias orgânicas voláteis (presentes na fumaça dos veículos). A reação ocorre na presença de luz solar, dada a influência dos raios ultravioletas, originando o termo fotoquímico. Esses poluentes, quando lançados na atmosfera, contribuem para o aparecimento de nevoeiro (CHEHEBE, 1997). Para a categoria de impacto Formação de oxidantes fotoquímicos, a unidade de referência admitida pelo método ReCiPe é o kg de composto de carbono orgânico volátil não metano (COVNM) emitido para o ar.

Para a categoria de impacto FOF, foram consideradas os aspectos relacionadas às emissões devidas à queima de biomassa para geração de energia na indústria (subsistema OPP) e a emissões devidas à produção da resina MDI e do pré-polímero (componente da resina PU-mamona).

- Ecotoxicidade (ET)

É a relativa ação prejudicial de substâncias tóxicas à fauna e a flora pelas atividades antrópicas. Tais efeitos podem afetar os organismos vivos, a função e a estrutura do ecossistema. Propriedades como persistência no ambiente (biodegradabilidade) e capacidade de se acumular nos organismos (bioacumulação), também são consideradas importantes para a determinação do grau de ecotoxicidade de uma substância. Para este estudo, foram selecionadas as categorias de impacto relacionadas a ocorrência de ecotoxicidade terrestre e a ecotoxicidade de água doce. O método ReCiPe, assume que, para essas categorias de impacto, seja adotada a unidade de referência diclorobenzeno (1,4 DB) equivalente, em kg de 1,4-DB eq/ kg de emissão.

Para a categoria de impacto ET, foram considerados os aspectos ambientais relacionados ao uso de pesticidas na preparação do solo no subsistema OF. Já para a categoria de impacto de ETa foram considerados os aspectos ambientais relacionados a emissão ocorrida durante a produção dos produtos químicos (termicida piretróide, parafina, resina MDI e pré-polímero) utilizados no

subsistema de produção OPP.

- Depleção fóssil (DF)

O termo combustível fóssil refere-se a um grupo de recursos que contêm hidrocarbonetos. O grupo varia de materiais voláteis (metano) a materiais não voláteis (carvão). A depleção fóssil é a extração de tais recursos da natureza e os impactos sobre o meio natural. O fator de caracterização pelo método ReCiPe é expresso em kg de óleo/kg de extração.

Os aspectos ambientais que contribuem significativamente com a categoria de impacto DF, são relativos aos produtos químicos (termicida piretróide e parafina), principalmente devidos à extração do petróleo bruto.

#### 3.5.1.6 Interpretação

Por fim, a interpretação é a fase da ACV em que as constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto são consideradas em conjunto, com base na definição dos objetivos e escopo do estudo (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

A interpretação deste estudo foi baseada nos resultados obtidos na fase de AICV e teve como propósito identificar os pontos quentes (“*hotspot*”) potenciais associados à cada categoria de impacto selecionada para ciclo de vida da produção do OSB (escalas laboratorial e industrial).

#### 3.5.1.7 Pressupostos e limitações

De forma a garantir a qualidade dos dados, pressupostos e limitações foram listados e descritos de forma consistentes para todas as partes dos sistemas analisados. Os pressupostos foram baseados nas limitações do estudo, como ausência de base de dados estabelecimento de cenários, técnicas realizadas nos procedimentos de cálculo necessário, restrições devida ao estabelecimento da fronteira do sistema de produto, etc. (ILCD, 2010; PIERKASKI, 2013; SILVA, 2012).

Os pressupostos foram relatados nos itens anteriores, conforme foram encontradas as limitações do estudo.

### 3.5.2 Análise do inventário do ciclo de vida (ICV)

A etapa de ICV consiste na segunda fase do desenvolvimento de um estudo de ACV. Segundo a norma ABNT NBR 14040, esta etapa está relacionada com a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificação dos fluxos de entrada de materiais, energia, e saídas como produtos, emissões, co-produtos, ao longo de todo o ciclo de vida do produto (Silva, 2012).

Para o desenvolvimento do ICV deste estudo foi realizada coleta de dados junto com a indústria brasileira produtora de OSB e com empresas florestais que são suas principais fornecedoras de madeira do gênero *Pinus*. As empresas florestais englobam desde a produção de mudas, plantio, manejo, colheita e transporte da madeira, enquanto que a fabricante de painel faz somente a produção industrial do OSB.

Para a coleta de dados, utilizou-se de algumas estratégias como visitas técnicas, realizadas com o objetivo de se conhecer melhor todo o processo de produção dos painéis. No entanto, não foi possível a realização de tais visitas para as empresas florestais. Além disso, também utilizou-se de montagem de questionários com perguntas sobre as características das empresas visitadas, construção de modelos de coleta de dados, conforme recomendado pela ABNT NBR 14040 (2009) em seu Anexo A e por fim de revisão bibliográfica sobre os assuntos em questão. A revisão bibliográfica foi muito importante para definir as fontes para obtenção dos dados secundários, utilizados quando não foi possível a obtenção de dados primários.

### 3.5.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

A AICV consiste na terceira fase da ACV. O principal objetivo desta fase foi avaliar os resultados do Inventário do ciclo de vida dos sistemas de produto deste estudo (laboratorial e industrial) e, por meio da modelagem de seus impactos, melhor compreender a significância ambiental do produto avaliado (ABNT NBR 14044, 2009; SOUZA, 2010).

Ainda, durante o desenvolvimento desta fase, foram realizados os itens mandatórios da AICV como:

- Seleção: consiste na seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização. Tentou-se, como as categorias de impacto selecionadas, refletir as principais questões ambientais vinculadas aos sistemas de produto estudado (laboratorial e industrial).

- Classificação: consiste na correlação das cargas ambientais de inventário com as

diferentes categorias de impacto selecionadas no estudo.

- Caracterização: envolve a conversão dos resultados de ICV para unidades comuns (indicadores de categoria) e a agregação dos resultados convertidos dentro de cada categoria de impacto. Ainda, dependendo do método de AICV escolhido, variações nos resultados dos indicadores de categoria podem ocorrer, por causa das diferenças entre os fatores de caracterização e devida a origem de cada método (ABNT NBR 14044, 2009; SILVA, 2012).

No presente trabalho para a fase de AICV selecionaram-se as categorias de impacto do método ReCiPe (2009), sendo as características que justificaram tais escolhas abordadas na seção 3.5.1.5.

#### **3.5.4 Interpretação**

A interpretação consiste na última fase da ACV. Nesta etapa foram identificados os principais “*hotspots*” ambientais para a fabricação do OSB na escala laboratorial e industrial. Além disso, com base nos resultados obtidos, foram propostos cenários alternativos de produção, a fim de melhorar o desempenho ambiental do produto, principalmente do OSB produzido industrialmente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na caracterização física e mecânica dos OSB, bem como os resultados obtidos na avaliação do ciclo de vida, como os principais “hotspots” referentes a produção do OSB em escala laboratorial e industrial e interpretação dos resultados obtidos na etapa AICV.

### 4.1 Caracterização física e mecânica dos OSB

#### 4.1.1 Teor de umidade e densidade

Os valores médios das propriedades teor de umidade e densidade dos OSB, referente os três tratamentos avaliados neste estudo estão apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** - Valores médios para as propriedades teor de umidade e densidade dos painéis

Tratamentos	Teor de umidade (%)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
C1	$\bar{x} = 9,57$	$\bar{x} = 0,62$
	$Cv (\%) = 4,57$	$Cv (\%) = 2,62$
C2	$\bar{x} = 9,70$	$\bar{x} = 0,61$
	$Cv (\%) = 3,95$	$Cv (\%) = 1,70$
C3	$\bar{x} = 10,01$	$\bar{x} = 0,61$
	$Cv (\%) = 8,21$	$Cv (\%) = 1,90$

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, observa-se que os valores médios relativos à densidade foram próximos à densidade nominal (0,60 g/cm<sup>3</sup>) prevista inicialmente para os painéis. O coeficiente de variação para densidade (1,70 – 2,62%) foi muito baixo, demonstrando a boa condução da etapa de manufatura dos painéis em laboratório.

A densidade média obtida para os três tratamentos avaliados neste estudo encontra-se de acordo com o valor médio de 0,62 g/cm<sup>3</sup>, reportado no relatório técnico 126 416-205 (IPT, 2012), emitido pelo IPT, para OSB produzidos e comercializados no país. Segundo este relatório, a caracterização dos painéis também foi realizada com base nas recomendações da norma EN 323 (1993) - *Wood-based panels-Determination of density*.

Os painéis, nos três tratamentos, se adequaram à classificação de média densidade, por apresentarem valores médios entre as faixas 0,60 a 0,80 g/cm<sup>3</sup> e 0,55 a 0,75 g/cm<sup>3</sup>, estabelecidas pelos documentos normativos ANSI/A1-280 (1993) e ABNT NBR 14810-2 (2013), respectivamente. Essas normas foram utilizadas para classificação de tal propriedade, pois o documento normativo EN 300 (2006) e os demais auxiliares utilizados como base para a determinação das propriedades físicas e mecânicas e categorização dos painéis deste estudo não classificam os painéis de partículas com relação à densidade.

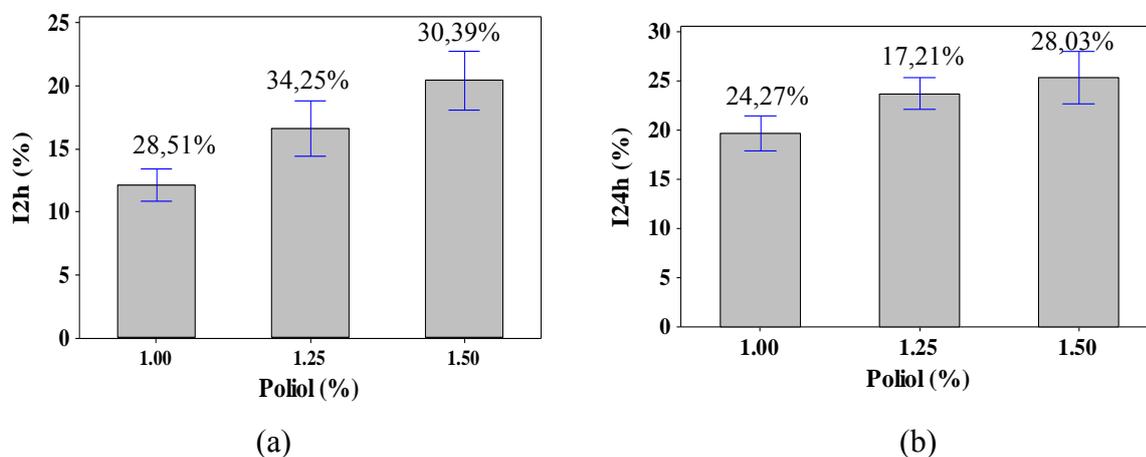
Para o teor de umidade, os valores médios encontram-se dentro das faixas recomendadas por normas. Segundo a ABNT NBR 14810-2 (2013), os painéis de partículas devem apresentar teor médio entre 5 e 11%. Para a EN 312 (2003), a umidade requerida deve estar entre 5 e 13%.

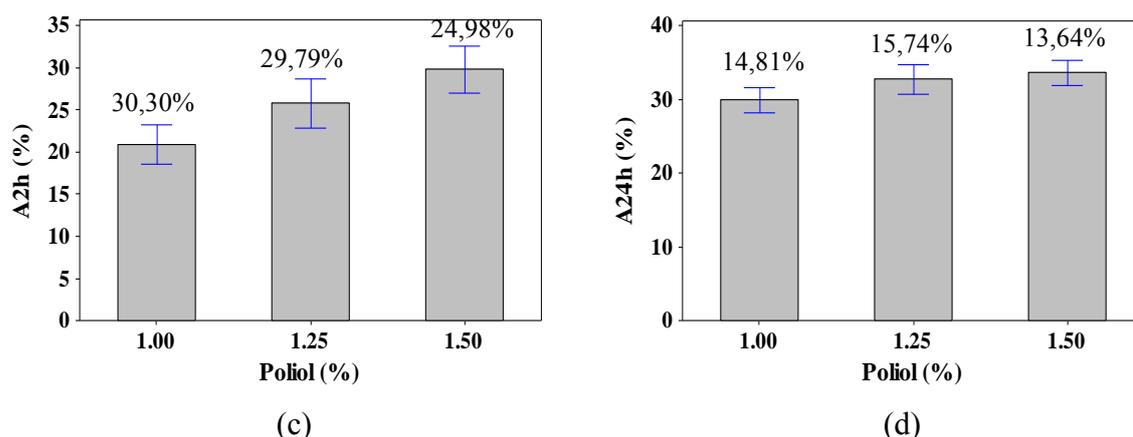
Quando comparados com a literatura, os valores médios aqui obtidos se encontram em conformidade. O teor de umidade reportado no relatório técnico do IPT para OSB foi  $7,8 \pm 3,0\%$ . Souza (2012), para OSB fabricado com madeira de *Pinus* sp. e resina PU-mamona, obteve valores médios entre 9,0% -10,3%. Ferro et al. (2015), para OSB produzido com madeira de *Schizolobium amazonicum* e resina PU-mamona, obteve valores médios entre 8,0 a 9,6%.

#### 4.1.2 Inchamento em espessura e absorção de água

Os resultados obtidos nos ensaios para a determinação do inchamento em espessura após 2h (I2h) e 24h (I24h) de imersão em água, bem como dos resultados de absorção de água após 2h (A2h) e 24h (A24h) de imersão em água estão apresentados na Figura 18.

**Figura 18** – Valores médios, intervalos confiança e coeficientes de variação das propriedades físicas: inchamento em espessura em 2 horas (a) e 24 horas (b), absorção de água após 2 horas (c) e 24 horas (d) de imersão





Fonte: Próprio autor.

A norma EN 300 (2006) cita somente aos valores da propriedade IE-24h de imersão. Comparando os valores médios apresentados na Figura 20 com os recomendados por norma, observa-se que a condição experimental C1 atingiu valor médio compatível ao máximo permitido (20%) para OSB do tipo 2 (Painéis para fins estruturais para uso em ambientes secos). Os valores médios para condições experimentais C2 e C3 estão de acordo com o máximo (25%) admitido pela EN 300 (2006) para OSB do tipo 1 (Painéis para uso geral sem capacidade de carga e painéis componente interiores utilizados em ambientes secos).

Os valores médios de I24h obtidos são coerentes quando confrontados com estudos análogos com OSB de densidades próximas e adesivo de mesma natureza. Nascimento et al. (2015) obtiveram, para OSB produzidos com *Piptadenia moniliformis* Benth e resina PU-mamona, I24h de 14,4%; Akrami Fruehwald e Barbu (2014) obtiveram para painéis de densidade 0,60 g/cm<sup>3</sup> fabricados com *Populus tremula* e *Fagus sylvatica* e adesivo isocianato (pMDI), valores de I24h entre 10,0 e 28,0 %.

Devido à ausência de normas que fazem menção às propriedades I2h, A2h e A24h, os valores médios resultantes deste trabalho foram comparados com a literatura. Assim, os resultados obtidos indicaram melhores desempenhos que os de: Mendes et al. (2012) para I2h de 31,9%, A2h de 91,5% e A24h de 102,4%, para OSB com densidade média de 0,63 g/cm<sup>3</sup> fabricados com madeira de *Pinus oocarpa* e resina fenol-formaldeído; Saldanha (2004) para I2h de aproximadamente 28,0%, A2h de 58,6% e A24h de 74,2%, para OSB produzidos com partículas *strands* de *Pinus taeda* com 0,7 mm de espessura. Saldanha e Iwakiri (2009) obtiveram para OSB de densidade de 0,65 g/cm<sup>3</sup> valores médios de I2h de 31,3%, A2h de 72,3% e A24h de 82,3% quando fabricados com resina MUF (melamina-ureia formaldeído) e I2h de 48,1%, A2h de 85,1% e A24h de 95,0 % quando utilizada a resina PMUF para adesão das

partículas.

Os melhores desempenhos obtidos em tais propriedades demonstram a eficiência da resina utilizada, PU-mamona, com relação às comumente utilizadas pela indústria brasileira.

#### - Análise estatística

A Tabela 5 apresenta os resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações de Student-Newman-Keuls para as propriedades inchamento em espessura e absorção de água após 2 e 24h de imersão.

**Tabela 5-** Resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações de Student-Newman-Keuls sobre as propriedades físicas

Propriedade	P-valor	Condições experimentais		
		C1	C2	C3
I2h (%)	0,000	C (12,15)	B (16,46)	A (20,38)
I24h (%)	0,000	B (19,54)	A (23,69)	A (25,31)
A2h (%)	0,000	B (20,87)	A (25,62)	A (29,75)
A24h (%)	0,008	B (29,95)	B (32,75)	A (33,70)

\*Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferenças estatísticas entre as médias.

Pela Tabela 5, observa-se que a proporção dos componentes polioli e pré-polímero da resina PU-manona foi influente em todas as propriedades investigadas, pois  $p\text{-valor} < 0,05$ .

Os resultados obtidos no teste de comparações de Student-Newman-Keuls demonstraram que, para as propriedades físicas I2h, I24h, A2h e A24h investigadas, a redução do componente pré-polímero da resina proporcionou maiores porcentagens de inchamento em espessura e absorção de água para os períodos investigados, ou seja, piores desempenhos.

Para I2h, os valores médios obtidos para as três proporções de resina mostraram diferença estatística entre si, sobressaindo-se os painéis com proporção de 1:1. Para I24h e A2h, observa-se que as condições experimentais C2 e C3 não apresentaram valores médios estatisticamente diferentes. Assim, a condição experimental C3 é a melhor alternativa por utilizar menor quantidade do componente de origem mineral. Ainda, para A24h, os valores médios das condições experimentais C1 e C2 não diferiram significativamente entre si,

sobressaindo a condição experimental C2 por utilizar menor quantidade de pré-polímero.

A redução das propriedades I2h, I24h, A2h e A24 com a diminuição do isocianato já era esperada. Estudos como Buckley et al. (2002) mostram que, além do isocianato ser uma substância hidrofóbica, esse componente da resina PU-mamona penetra profundamente na madeira, principalmente nos lúmens dos vasos e na superfície interna das paredes das células. Quando submetidos aos ensaios físicos de inchamento em espessura e absorção de água, após 2 e 24h de imersão, esses espaços, normalmente preenchidos por água, já se encontram com isocianato. Como decorrência, menor quantidade de água será retida. Pode-se então concluir que, com a diminuição da quantidade do isocianato, menos preenchidos estarão os lúmens dos vasos e a superfície interna da parede celular. Deste modo, maior será a absorção de água na madeira.

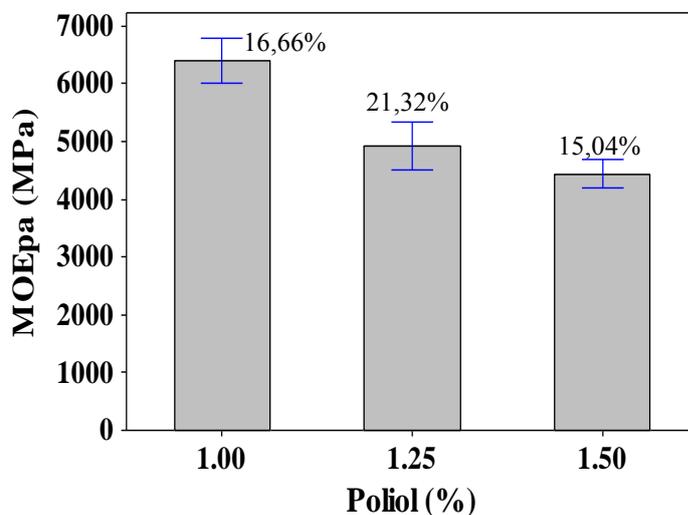
#### **4.1.3 Flexão estática**

A seguir estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de flexão estática para determinação do módulo de elasticidade e do módulo de ruptura (paralelo e perpendicular à orientação das partículas).

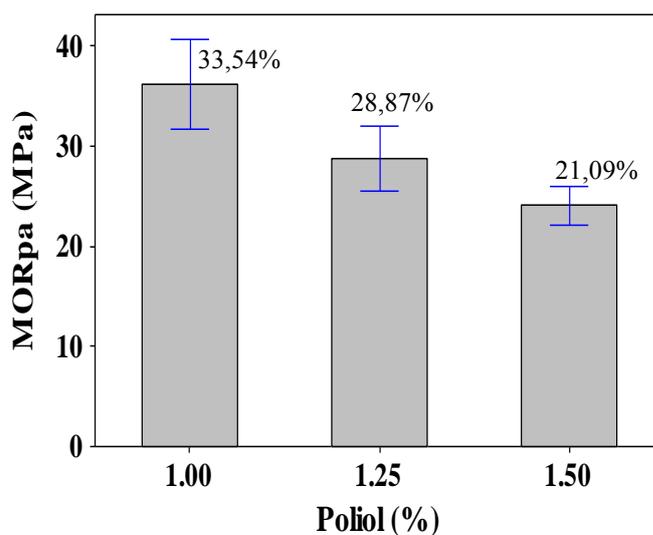
##### **4.1.3.1 Módulo de elasticidade e módulo de ruptura paralelo à orientação das partículas**

A Figura 19 apresenta os valores médios obtidos para as propriedades de módulo de elasticidade (MOE<sub>pa</sub>) e módulo de ruptura (MOR<sub>pa</sub>) paralelo à orientação das partículas, determinados por intermédio do ensaio de flexão estática, para os tratamentos estudados.

**Figura 19-** Valores médios, intervalos de confiança e coeficientes de variação das propriedades módulo de elasticidade (a) e de resistência (b) na flexão estática na direção paralela à orientação das partículas



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

Observa-se, na Figura 19, que para MOE os tratamentos C1 e C2 atingiram o valor mínimo (4800 MPa) recomendado pela norma EN 300 (2006) para OSB do tipo 4 (Painéis especiais para fins estruturais utilizados em ambientes úmidos). O tratamento C3 atingiu o valor mínimo de 3500 MPa recomendado pela EN 300 (2006) para OSB do tipo 3 (Painéis especiais para fins estruturais utilizados em ambientes úmidos).

A EN 300 (2006) recomenda, para MOR do OSB do tipo 4, valor mínimo de 30 MPa.

Como se observa na Figura 19, somente o tratamento C1 atingiu tal valor. Os resultados para os tratamentos C2 e C3 foram compatíveis aos 22 MPa referentes ao OSB do tipo 3.

Todavia, é importante destacar que apesar das diferentes categorizações normativas recebidas pelos tratamentos, ambas são destinadas para fins estruturais.

Souza (2012), em estudo com OSB produzidos com madeira de *Pinus* sp. e resina poliuretana à base de óleo de mamona, encontrou para painéis com densidade de 0,70 g/cm<sup>3</sup> e composição das partículas nas camadas externas e interna de 20:60:20, valores médios de MOE e MOR de aproximadamente 6600 MPa e 42 MPa, respectivamente. Os valores médios encontrados pelo autor são superiores aos obtidos neste estudo, todavia, esse resultado se deve à diferença entre as densidades dos painéis, e ao uso da madeira de desbaste neste trabalho.

Carvalho et al. (2015) avaliou o desempenho de OSB fabricados com adesivos comerciais (ureia-formaldeído e fenol-formaldeído) e adesivos alternativos (tânicos de acácia-negra e de barbatimão). Para painéis fabricados com 0,65 g/cm<sup>3</sup> e composição das partículas de 25:50:25 (face/miolo/face), os autores obtiverem para MOE valores de que variaram de 2986 MPa para os painéis com adesivo tânico de acácia até 3438 MPa para os OSB fabricados com resina fenol-formaldeído. Para MOR, os autores encontram valores médio que variaram de 15 MPa, novamente para os painéis com adesivo tânico de acácia, até 29 MPa para os OSB fabricados com resina fenol formaldeído. Comparando os resultados deste trabalho com a literatura citada, todos os tratamentos apresentaram valores médios superiores em relação ao MOE, e apenas o tratamento C3 não apresentou valores médios superiores em relação ao MOR.

Por fim, os valores médios do tratamento C1 se apresentaram coerentes em relação aos valores de 5080 MPa e 38,5 MPa para o MOE e MOR, respectivamente, reportado no relatório técnico do IPT 126 416-205 (IPT, 2012), no qual foram avaliados os desempenhos físico-mecânico de OSB produzidos e comercializados no país. Os tratamentos C2 e C3 apresentaram valores médios coerentes quando comparados a tal literatura.

#### *- Análise estatística*

A Tabela 6 apresenta os resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações de Student-Newman-Keuls para o módulo de elasticidade (MOE<sub>pa</sub>) e módulo de ruptura (MOR<sub>pa</sub>) paralelo à orientação das partículas.

**Tabela 6-** Resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações de Student-Newman-Keuls sobre as propriedades MOE<sub>pa</sub> e MOR<sub>pa</sub>

Propriedade	P-valor	Condições experimentais		
		C1	C2	C3
<b>MOE<sub>pa</sub> (MPa)</b>	0,000	B (6395,14)	B (4909,23)	A (4488,27)
<b>MOR<sub>pa</sub> (MPa)</b>	0,000	B (36,40)	B (27,30)	A (23,52)

\*Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferenças estatísticas entre as médias.

Pela Tabela 6, observa-se que a proporção dos componentes poliol e pré-polímero da resina PU-manona foi influente nas propriedades investigadas, pois  $p\text{-valor} < 0,05$ . Os resultados obtidos no teste de Student-Newman-Keuls demonstraram que, para MOE<sub>pa</sub> e MOR<sub>pa</sub>, os melhores desempenhos foram obtidos para os painéis fabricados com maior quantidade de pré-polímero.

Para as propriedades investigadas, nota-se que as condições experimentais C1 e C2 não apresentaram valores médios estatisticamente equivalentes. Assim, a condição experimental C2 se sobressai por utilizar menor quantidade do componente pré-polímero.

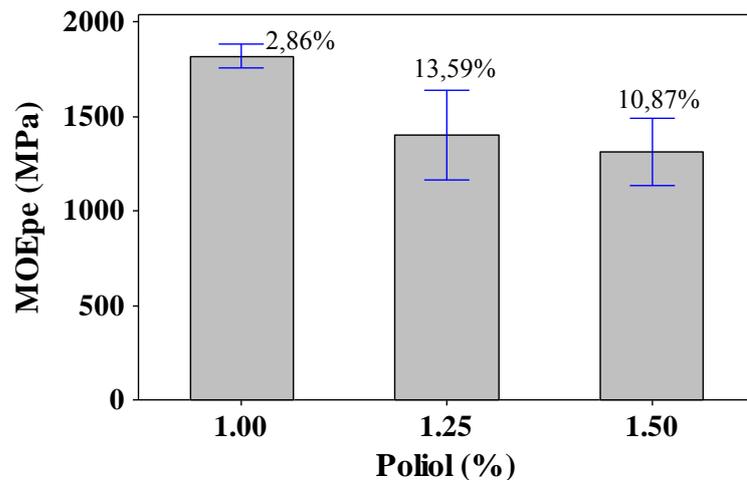
Os melhores desempenhos obtidos nos painéis fabricados com maior quantidade de isocianato (C1 e C2), se justificam pelas ligações que esse componente faz com a madeira. O isocianato possui um grupo altamente reativo ( $-N = C = O$ ) que reage com a hidroxila presente no componente poliol, em alguns componentes da madeira (celulose, hemicelulose e lignina), bem como na água presente na madeira. Segundo Bao et al. (2003), o isocianato penetra profundamente na madeira, principalmente nas superfícies das células e nos lúmens dos vasos. Nessas condições, reage com a umidade disponível armazenada na madeira para formar estruturas de ureia lineares e/ou estruturas reticuladas em nível molecular. Além disso, o isocianato pode realizar ligações de hidrogênio com os componentes químicos da madeira (CHEN et al., 1998), as quais contribuem para a adesão.

Sendo assim, o principal componente da resina PU-manona na ligação adesivo-madeira é o isocianato. Uma vez diminuída a quantidade desse componente na resina, menos ligações haverá entre a resina e a madeira. Consequentemente, inferior será o desempenho mecânico dos painéis.

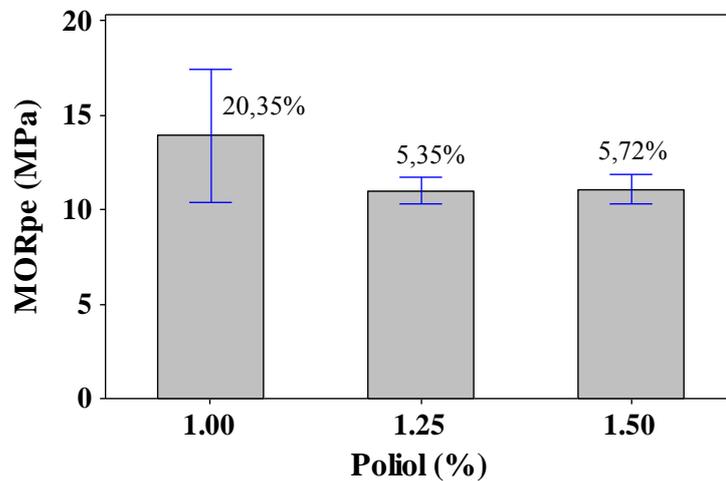
#### 4.1.3.2 Módulo de elasticidade e módulo de ruptura perpendiculares à orientação das partículas

Estão apresentados na Figura 20 os resultados referentes ao módulo de elasticidade (MOE<sub>pe</sub>) e ao módulo de ruptura (MOR<sub>pe</sub>) perpendicular à orientação das partículas *strands*, obtidos a partir do ensaio de flexão estática.

**Figura 20-** Valores médios, intervalos de confiança e coeficientes de variação das propriedades módulo de elasticidade (a) e de resistência (b) na flexão estática na direção paralela à orientação das partículas



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado na Figura 20, as condições experimentais C1 e C2 atingiram o valor mínimo de 1400 e 11 MPa, para o MOE e MOR, respectivamente, recomendados pela EN 300 (2006) para OSB dos tipos 2 e 3. Tais OSB são recomendados para aplicações

estruturais. A condição experimental C3 atingiu o valor mínimo de 1200 e 10 MPa, para o MOE e MOR, respectivamente, recomendado pela norma europeia para OSB do tipo 1.

Confrontando os valores médios de MOE<sub>pe</sub> e MOR<sub>pe</sub> aqui obtidos com a literatura, observa-se que há coerência entre os resultados. Surdi (2012), para OSB com densidade 0,61 g/cm<sup>3</sup> e proporção de partículas de 30:40:30 (face/miolo/face) produzido com híbridos e resina fenol-formaldeído, obteve valores médios de 992 e 15,3 MPa para o MOE<sub>pe</sub> e MOR<sub>pe</sub>, respectivamente.

Neimsuwan (2004), para OSB com densidade de 0,61 g/cm<sup>3</sup> e proporção de partículas de 30:40:30 (face/miolo/face) fabricado com resina MDI, obteve valores médios de 1381 MPa para o MOE<sub>pe</sub> e 13,5 MPa para o MOR<sub>pe</sub>. Além disso, Han et al. (2007b) avaliaram o efeito da quantidade de finos nas propriedades físicas e mecânicas de OSB e obtiveram valores de MOE<sub>pe</sub> 1460,0 e 2010,0 MPa para painéis fabricados com 47,75 e 12,75% de finos, respectivamente. Para o MOR<sub>pe</sub>, os valores obtidos pelos autores foram 21,2 e 25,9 MPa, respectivamente, para os teores de finos citados. Segundo os autores, a redução em tais propriedades com o aumento do teor de finos pode ser atribuída à orientação randômica que as pequenas partículas podem assumir nas camadas externas do painel, uma vez que a orientação das partículas *strands* contribue para propriedades de flexão (MOE e MOR) superiores.

Ainda, quando comparado com os resultados médios de 2490,0 e 22,4 MPa para MOE<sub>pe</sub> e MOR<sub>pe</sub>, respectivamente, reportados no relatório técnico do IPT 126 416-205 (IPT, 2012) para OSB fabricados com proporção de partículas 20:60:20 (face/miolo/face), os valores desse estudo apresentaram-se inferiores.

Tal resultado pode ser atribuído principalmente a dois fatores. Primeiro à maior quantidade de finos presentes nos OSB deste estudo, uma vez que eles foram fabricados com madeiras provenientes de desbastes (menor qualidade), as quais durante o processo de geração de partículas resultam em *strands* com grandes variações dimensionais e grande quantidade de finos. Na indústria, como citado, há uma etapa de classificação das partículas na fabricação do OSB, cujo objetivo é reduzir a quantidade de finos presente nos painéis, enquanto que na produção em laboratório não há esse tipo de classificação. O segundo fator é a proporção de partículas nas camadas externa e interna do painel. Autores como Suzuki e Takeda (2000) e Iwakiri et al. (2002) relatam que as propriedades de flexão estática no sentido paralelo e perpendicular à orientação das partículas podem ser afetadas pela proporção de partículas nas camadas do painel, sendo que tais propriedades podem atingir um equilíbrio de resistência com 25% das partículas nas camadas externas (25:50:25).

- *Análise estatística*

A Tabela 7 apresenta os resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações de Student-Newman-Keuls para o módulo de elasticidade (MOE<sub>pe</sub>) e o módulo de ruptura (MOR<sub>pe</sub>), perpendiculares à orientação das partículas.

**Tabela 7** - Resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações de Student-Newman-Keuls sobre as propriedades MOE<sub>pe</sub> e MOR<sub>pe</sub>

Propriedade	P-valor	Condições experimentais		
		C1	C2	C3
MOE <sub>pe</sub> (MPa)	0,000	B (1818,20)	B (1401,20)	A (1314,90)
MOR <sub>pe</sub> (MPa)	0,031	A (13,40)	B (11,30)	B (11,10)

\*Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferenças estatísticas entre as médias.

Pela Tabela 7, observa-se que a proporção dos componentes polioliol e pré-polímero da resina PU-manona foi influente em todas as propriedades investigadas, pois P-valor < 0,05. Os resultados obtidos no teste de comparações de Student-Newman-Keuls demonstraram que, para MOE<sub>pe</sub> e MOR<sub>pe</sub>, os melhores desempenhos foram obtidos para os painéis fabricados com maior quantidade de pré-polímero, condição experimental C1.

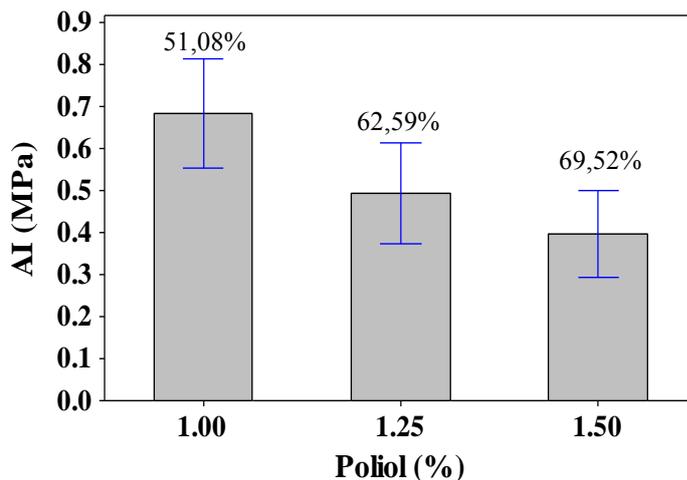
Ainda na Tabela 7, para o MOE<sub>pe</sub>, nota-se que as condições experimentais C1 e C2 apresentaram valores médios estatisticamente equivalentes. Deste modo, a condição experimental C2 se sobressai por utilizar menor quantidade de pré-polímero. No que se refere ao MOR<sub>pe</sub>, observa-se que as médias resultantes das condições experimentais C2 e C3 apresentaram diferenças estatísticas. Assim, pode-se dizer que a condição experimental C3 é a melhor opção por utilizar menor quantidade de isocianato.

Assim, como para MOE<sub>pa</sub> e MOR<sub>pa</sub>, a redução do desempenho das propriedades de flexão estática no sentido perpendicular à orientação dos *strands* se deve à menor quantidade de ligações entre resina e madeira, pois o isocianato é o principal responsável por elas.

#### 4.1.4 Tração perpendicular às faces

Estão apresentados na Figura 21 os valores médios de resistência à tração perpendicular às faces ou adesão interna (AI), obtidos para os tratamentos estudados.

**Figura 21-** Valores médios, intervalos confiança e coeficientes de variação da resistência à tração perpendicular às faces



Fonte: Próprio autor.

Pela Figura 21, pode-se dizer que os painéis referentes aos tratamentos C1 e C2, quando comparados com a EN 300 (2006), atingiram, para a resistência à tração perpendicular as faces, o valor mínimo de 0,5 MPa recomendado para OSB do tipo 4. O tratamento C3, com valor médio 0,42 MPa, foi classificado como OSB do tipo 3, com valor mínimo exigido para a resistência à tração perpendicular as faces de 0,34 MPa. As duas categorizações definidas pela norma europeia (OSB/4 e OSB/3) são destinados às aplicações estruturais.

Os valores médios deste estudo encontram-se coerentes com os resultados que constam na literatura, para OSB fabricados com resina fenol-formaldeído (utilizada comercialmente) e densidade nominal de 0,65 g/cm<sup>3</sup>. Por exemplo, Saldanha e Iwakiri (2009), para OSB com *Pinus taeda* L, encontraram valores médios para a resistência à tração perpendicular às faces 0,39 MPa; Mendes (2011), para OSB produzidos com madeira da mesma espécie, encontrou valores médios de 0,54 MPa; Surdi (2012) encontrou, para OSB com madeira do híbrido de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, valores médios de 0,60 MPa, enquanto que para painéis produzidos com *Pinus taeda* L., valores médios foram 0,50 MPa; Carvalho et al. (2015) para OSB com madeira de *Pinus oocarpa* obteve valores médios de 0,64 MPa; Bastos (2009) para painéis comerciais, obteve valores médios de 0,67 MPa.

Quando comparados com valores de resistência a AI para OSB fabricados com resina PU-mamona, os valores médios deste trabalho também foram compatíveis. Ferro (2013), para OSB fabricados com madeira de Paricá e densidade  $0,65 \text{ g/cm}^3$ , obteve valores de  $0,56 \text{ MPa}$ ; Souza (2012), para OSB fabricados com *Pinus* sp. e densidade nominal próxima de  $0,8 \text{ g/cm}^3$ , obteve  $1,55 \text{ MPa}$ ; Nascimento et al. (2015), para painéis fabricados com madeira da caatinga do Nordeste brasileiro, como Marmeleiro (*Croton sonderianus* Muell. Arg.) e densidade nominal de  $0,66 \text{ g/cm}^3$ , Jurema-branca (*Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke) e densidade nominal de  $0,73 \text{ g/cm}^3$ ; Catanduva (*Piptadenia moniliformis* Benth.) e densidade nominal de  $0,64 \text{ g/cm}^3$ , obtiveram valores médios de adesão interna de  $0,45 \text{ MPa}$ ,  $0,58 \text{ MPa}$  e  $0,68 \text{ MPa}$ , respectivamente.

O relatório técnico do IPT 126 416-205 (IPT, 2012), referente ao desempenho dos OSB brasileiro, não faz menção à propriedade de AI.

É importante ressaltar que os painéis deste estudo apresentaram densidade nominal próxima de  $0,60 \text{ g/cm}^3$ , ou seja, inferior às densidades dos trabalhos encontrados na literatura e, mesmo assim, os resultados foram compatíveis para os três tratamentos avaliados (C1, C2 e C3). Tal resultado pode ser atribuído principalmente a dois fatores: a quantidade de finos presentes nos painéis, provenientes da utilização de madeira de desbastes, e a resina utilizada. Para o fator quantidade de fino, o estudo realizado por Han et al. (2007) mostrou que painéis com maior quantidade de finos apresentam melhor desempenho para AI. Segundo os autores, os finos podem preencher os vazios nos painéis de baixa densidade e melhorar, conseqüentemente, o desempenho relacionado a tal propriedade. Resultados similares foram obtidos por Mirski and Dziruka (2011) e Akrami et al. (2014). No que diz respeito ao fator tipo de resina empregada, vários estudos como Bertolini et al. (2014), Dias (2005), Ferro et al., (2015), Macedo et al., (2016), Nascimento e Morales (2006), Souza et al., (2014) e Varanda et al., (2014) confirmaram o bom desempenho da resina poliuretana à base de óleo de mamona nas propriedades mecânicas, tal como AI, para painéis compósitos à base de madeira.

#### - Análise estatística

A Tabela 8 apresenta os resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações de Student-Newman-Keuls para a propriedade adesão interna.

**Tabela 8-** Resultados da ANOVA de Kruskal-Wallis e do teste de comparações de Student-Newman-Keuls sobre a propriedade adesão interna

Propriedade	P-valor	Condições experimentais		
		C1	C2	C3
AI (MPa)	0,002	B (0,67)	B (0,49)	A (0,37)

\*Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferenças estatísticas entre as médias.

Pela Tabela 8, pode-se observar que a proporção dos componentes polioli e pré-polímero da resina PU-manona foi influente na propriedade AI, pois  $p\text{-valor} < 0,05$ . Os resultados obtidos no teste de comparações de Student-Newman-Keuls demonstraram que os melhores desempenhos foram obtidos para os painéis fabricados com maiores quantidades de pré-polímero, condições experimentais C1 e C2.

Ainda pela Tabela 8, nota-se que as condições experimentais C1 e C2 apresentaram valores médios estatisticamente equivalentes. Assim, a condição experimental C2 se sobressai por utilizar menor quantidade do componente pré-polímero.

Como para as demais propriedades mecânicas, a redução do desempenho das propriedades de adesão interna com a redução da quantidade do componente isocianato ocorre devido à menor quantidade de ligações entre resina e madeira, uma vez que tal componente é o principal responsável por essas ligações.

## 4.2 Avaliação do ciclo de vida dos OSB

A seguir estão apresentados e discutidos os resultados obtidos em cada uma das fases de desenvolvimento da ACV.

### 4.2.1 Definição do objetivo e escopo

O objetivo deste estudo foi analisar o sistema de produção industrial brasileira e laboratorial do OSB a partir de uma perspectiva de ACV, bem como identificar os “*hotspots*” ambientais ao longo do ciclo de produção do painel, a fim de melhorar seu desempenho ambiental. O estudo abrangeu todo o ciclo de vida do sistema de produção, nas escalas industrial e laboratorial, sob uma perspectiva “*cradle-to-gate*”, ou seja, o estudo envolveu desde a produção e extração de recursos, transporte das matérias-primas até o local de produção do painel, operações de produção do painel. Todavia, as

etapas subsequentes não foram incluídas no estudo.

Com relação à ACV realizada para a produção industrial brasileira, a empresa considerada para avaliação se localiza em Ponta Grossa, estado do Paraná. A região Sul do Brasil, composta por três estados (Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná), é um importante polo industrial relacionado à produção madeireira e produtos de madeira, como painéis à base de madeira, móveis, celulose e papel (ABRAF, 2013). Além disso, aproximadamente 90% da produção potencial da madeira do gênero *Pinus* no Brasil ocorrem nessa região (ABRAF, 2013). Na ACV realizada para a produção laboratorial de OSB, foi considerado o Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo. O LaMEM é reconhecido mundialmente devido às suas pesquisas no âmbito de estruturas de madeiras e compósitos à base de madeira.

Espera-se que os resultados desse estudo possam orientar trabalhos acadêmicos relacionados à temática de ACV para painéis compósitos à base de madeira e, simultaneamente, a indústria produtora de OSB. Dessa forma, informações importantes referentes ao local de ocorrência dos principais impactos ambientais potenciais durante a fabricação do OSB (em escala industrial e laboratorial), e dos impactos ambientais devido a utilização de alguns insumos alternativos (resina poliuretana à base de óleo de mamona, madeira de desbastes), poderão ser disponibilizados, de forma a amparar pesquisas científicas e a empresa produtora de OSB, a fim de possibilitar a melhoria do desempenho ambiental do seu produto.

Entre as principais razões para o desenvolvimento deste estudo, encontra-se o crescimento da utilização dos OSB em nível mundial devido à substituição, em muitos casos, das chapas compensadas por este tipo de painel; a ausência de estudos de ACV para painéis OSB no Brasil, havendo, então, a possibilidade de disponibilizar dados adequados à realidade brasileira associados ao ciclo de vida deste produto; geração de conhecimento científico para direcionamento de ações e pesquisas para a redução de aspectos e impactos ambientais associados ao ciclo de vida do OSB; real conhecimento dos impactos associados ao uso de insumos alternativos na produção do OSB.

O público alvo deste trabalho concentra-se a Academia, para subsidiar o desenvolvimento de novas pesquisas relacionadas à ACV para painéis compósitos à base de madeira, além de consumidores de OSB, indústrias produtoras de painéis à base de madeira e o poder público para o direcionamento para planos, como de resíduos sólidos.

Cada item do escopo, estabelecido pelas normas brasileira ABNT NBR 14040 (2009) e ABNT NBR 14044 (2009), está detalhado a seguir.

#### 4.2.1.1 Unidade funcional e fluxo de referência

Neste estudo, para escala industrial, a unidade funcional adotada foi de 1 m<sup>3</sup> de OSB sob a classificação de tipo “*home*”, sem revestimento, com densidade média de 600 kg/m<sup>3</sup> e 10 mm de espessura, produzido seguindo as práticas atuais no Brasil, descritas em 2.5.1 (LP BRASIL, 2016). Uma unidade volumétrica também foi considerada por outros autores em estudos ambientais para compósitos à base de madeira como o de González-García et al. (2009a) e Silva et al. (2015). Para a escala laboratorial, a unidade funcional adotada também foi de 1 m<sup>3</sup> de OSB, com densidade média de 600 kg/m<sup>3</sup> e 10 mm de espessura. O estabelecimento desses critérios se faz importante, pois ao se trabalhar com painéis com espessuras diferentes da faixa exposta, por exemplo, ocorrem alterações no consumo de recursos para a produção dos painéis e, conseqüentemente, os fluxos de entrada e saída dos ICVs sofrem modificações.

Como mencionado, neste estudo, para ambas as escalas de produção estudadas, o fluxo de referência estabelecido foi igual à unidade declarada, ou seja, a produção de 1m<sup>3</sup> de OSB, com as características técnicas supracitadas.

#### 4.2.1.2 Descrição do sistema de produto e fronteira dos sistemas

Como mencionado o sistema estudado foi dividido em dois subsistemas: Operações florestais (OF) e Operações de produção de painel (OPP) e, além disso, cada subsistema foi definido para a escala industrial e laboratorial. As descrições dos subsistemas estão apresentadas a seguir.

##### **Operações florestais (OF)**

Foram incluídas todas as atividades realizadas na floresta, a fim de se obter a principal matéria-prima para produção do painel, a madeira do gênero *Pinus*. As atividades relacionadas às operações florestais para a escala industrial foram preparação do solo, plantio de mudas, manejo florestal, colheita florestal e estabelecimento de infraestrutura. Para a escala laboratorial, além das cinco atividades mencionadas, também foi incluso o desbaste. Tais atividades encontram-se detalhadas a seguir.

- Preparação do solo

É a primeira etapa da gestão do plantio do gênero *Pinus*. Consiste em um conjunto de operações realizadas para elevar ou manter os rendimentos da madeira de *Pinus* por meio da melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo (STAPE, 2002). As operações realizadas dentro dos limites deste subsistema são: controle de pragas, capina química, rebaixamento de cepas, arrançamento de resíduos, subsolagem e, finalmente, adubação mineral.

O primeiro passo da etapa de preparação do solo é o processo de controle de pragas, para combater o ataque de formigas, por meio da aplicação de isca formicida à base de sulfluramida. Em seguida, é realizado o processo de capina química, objetivando combater o desenvolvimento de ervas daninhas na área de cultivo. Este processo consiste na aplicação de herbicida glifosato. Nesta atividade, o herbicida diluído é pulverizado. Na preparação do solo são utilizados 16% da quantidade total de glifosato necessária na produção do *Pinus* (STAPE, 2002; SIXEL, 2009).

Rebaixamento de cepa é a próxima etapa, para diminuir os tocos restantes na área de plantio e facilitar o realinhamento no sentido de preparo do solo (MALINOVSKI, 2011). Em seguida, realiza-se o arrançamento de resíduos, isto é, a distribuição de resíduos da floresta orgânica, como folhas, casca e raízes, com a auxílio de trator com uma via limpa implementada.

Na sequência é realizado a etapa de subsolagem, na qual ocorre a agitação do solo. Esta atividade consiste na aração profunda do solo (maior que 30 cm) por meio de subsolador, acoplado a um trator convencional (SIXEL, 2009). A operação final da preparação do solo é a adubação mineral utilizando tratores convencionais com pulverizador acoplado, que visa fornecer nutrientes ao solo por meio da aplicação de fertilizantes. Os principais fertilizantes aplicados são a ureia e sulfato de amônio (fertilizantes à base de Nitrogênio- N) superfosfato (fertilizantes à base de Fósforo- P), cloreto de potássio (fertilizante à base de Potássio- K) (SANTOS et al., 2007). Neste subsistema, aplicam-se respectivamente 20, 40 e 100% da quantidade total de adubos baseados em N, em K e 100% P (SANTOS et al., 2007).

- Plantio de mudas

É o segundo estágio realizado na gestão de reflorestamento do gênero *Pinus*. Esta etapa inclui processos como plantio, irrigação e replantio.

O plantio é o primeiro processo. Aproximadamente 1750 mudas de *Pinus* são plantadas por ha, com o auxílio de um trator, com disco sulcador acoplado. O trator abre as covas e, então,

manualmente a muda de *Pinus* é introduzida. Após o plantio das mudas, a terra é irrigada com água (processo de irrigação), com objetivo de fornecer os requisitos iniciais (aproximadamente 3500 l·ha<sup>-1</sup>) para o desenvolvimento das plantas. A irrigação é conduzida por carreta pipa tracionada por trator. Por último, realiza-se o replantio, no qual aproximadamente 200 mudas por ha são replantadas. Este processo deve ser feito de 15-45 dias após o plantio. A produção de mudas em um viveiro foi excluída dos limites do sistema devido à falta de dados reais e valiosos.

- Manejo florestal

É a terceira etapa da gestão de reflorestamento do gênero *Pinus*. As operações incluídas neste processo são o controle de pragas, a capina química e a adubação mineral. Essas atividades são realizadas da mesma forma que na etapa Preparação do solo, e as mesmas máquinas são utilizadas. Porém, as taxas de aplicação de produtos químicos são diferentes. As aplicações de herbicida e inseticidas são importantes para assegurar a limpeza da área plantada, permitindo que as plantas atinjam tamanho suficiente para dominar a vegetação invasiva (ervas daninhas) e resistir ao ataque de formigas (SILVA, 2012). No cenário analisado, o inseticida foi aplicado todos os anos (do 1<sup>o</sup> ao 12<sup>o</sup>), enquanto o herbicida foi aplicado apenas no 1, 2, 3, 4, 8, 9 e 10<sup>o</sup> anos. Com relação à adubação mineral, esta visa suprir os nutrientes da planta e é realizada nos anos 1, 2, 3, 7 e 8.

- Colheita florestal

É a última etapa realizada em reflorestamento do gênero *Pinus* e envolve processos de colheita, extração e carregamento. Após 12 anos (plantio destinado a produzir madeira para a fabricação de painéis) e após 20 anos (regime de multiprodutos) do plantio inicial, as árvores são finalmente colhidas por meio de uma colheitadeira (*harvester*). Esta máquina, além de cortar a árvore, também remove os ramos e cascas, e pode traçar as toras, quando necessário. A etapa seguinte é a extração das toras de madeira, isto é, a tora de madeira é removida do lugar de corte até a estrada da floresta por *forwarder*. Por fim, ocorre a etapa de carregamento, no qual toras são carregadas em caminhões e transportadas até o local de produção do painel. O carregamento é realizado por carregadores florestais acoplados a uma escavadeira. A Figura 22 mostra as máquinas utilizadas nas etapas de desbastes e colheita florestal.

**Figura 22** – Máquinas utilizadas na colheita florestal. a) Colheitadeira do tipo *harvester*. b) Máquina de extração “*forwarder*”



(a)



(b)

Fonte: [deere.com.br](http://deere.com.br) (2017).

- Desbastes

Os desbastes comerciais foram apenas considerados para estudo da ACV em escala laboratorial, uma vez que a matéria-prima utilizada para a escala industrial é madeira virgem, proveniente de reflorestamentos. Sendo assim, a matéria-prima considerada para fabricação do OSB na escala laboratorial foi a madeira resultante das operações de desbastes. Os desbastes comerciais consistem na retirada de algumas árvores durante o período de desenvolvimento da floresta. Árvores mal formadas, tortas, com bifurcação, doentes são removidas nesta etapa. Para este estudo foi considerada a realização de dois desbastes comerciais, 4 e 12 anos após o plantio inicial das árvores, respectivamente. O desbaste comercial envolve os mesmos processos da Colheita florestal: colheita, extração e carregamento. O corte é também realizado por meio de uma colheitadeira (*harvester*), a extração das toras de madeira do local de corte até a estrada é feita por um *forwarder*, e o carregamento das toras de madeira no caminhão, o qual irá transportar a tora até seu destino final, é realizado por carregador florestal acoplado a uma escavadeira.

No primeiro desbaste, aos 4 anos, foram removidos aproximadamente 94,7 m<sup>3</sup>/ha de árvore, enquanto que no segundo desbaste, aos 12 anos, foram removidos 174,7 m<sup>3</sup>/ha de árvore (SCOLFORO et al., 2001).

- Estabelecimento de infraestruturas

Consiste na construção e manutenção de estradas e visa facilitar atividades de

exploração e é realizado como um serviço preliminar para as atividades relacionadas à preparação do solo e manejo florestal. Para essas atividades, máquinas como motoniveladoras, retroescavadeiras e tratores são essenciais.

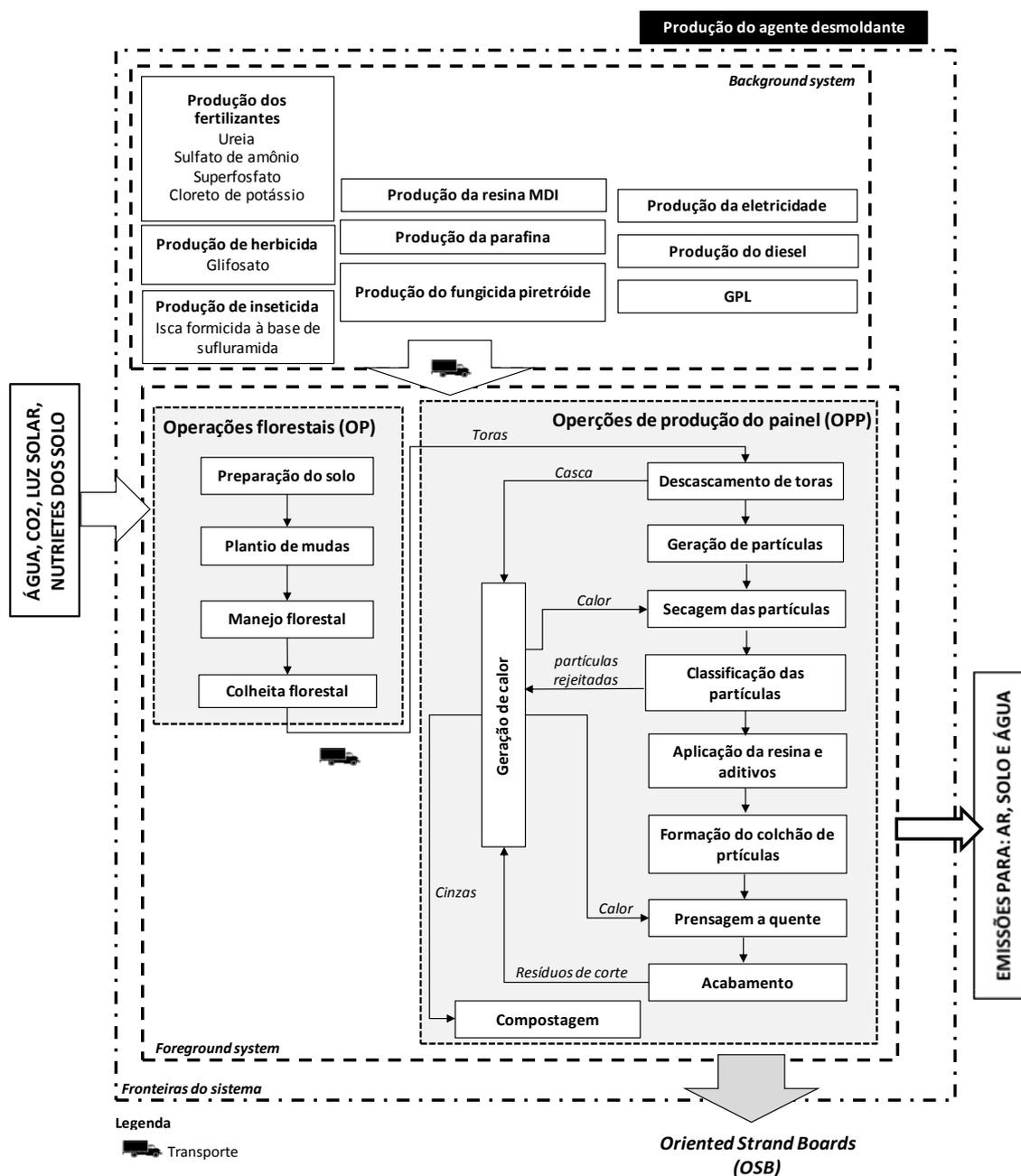
### **Operações de produção do painel (OPP)**

Inclui todas as atividades realizadas para produção do OSB. Este subsistema foi realizado para a escala industrial e laboratorial, separadamente, sendo que cada atividade foi detalhada nos itens 2.5.1 e 3.3 para a escala industrial e escala laboratorial, respectivamente. Nas Figuras 23 e 24, estão apresentados os sistemas de produtos para os OSB produzidos nas escalas industrial e laboratorial, respectivamente.

- Escala industrial

A Figura 23 mostra o sistema de produto para a produção do OSB em escala industrial em uma abrangência *cradle-to-gate*.

**Figura 23-** Fronteiras do sistema do ciclo de vida da produção OSB, em escala industrial, (perspectiva *cradle-to-gate*). A caixa preta corresponde a processos excluídos da fronteira do sistema.



Fonte: Próprio autor.

Como pode ser visto na Figura 23, vários processos auxiliares foram incluídos dentro dos limites do *background system*.

*Background system* inclui: i) a produção de insumos energéticos, como a produção de eletricidade na rede nacional brasileira e os combustíveis fósseis (diesel utilizado pelos maquinários florestais, pelos caminhões nos transportes dos insumos e no transporte interno da

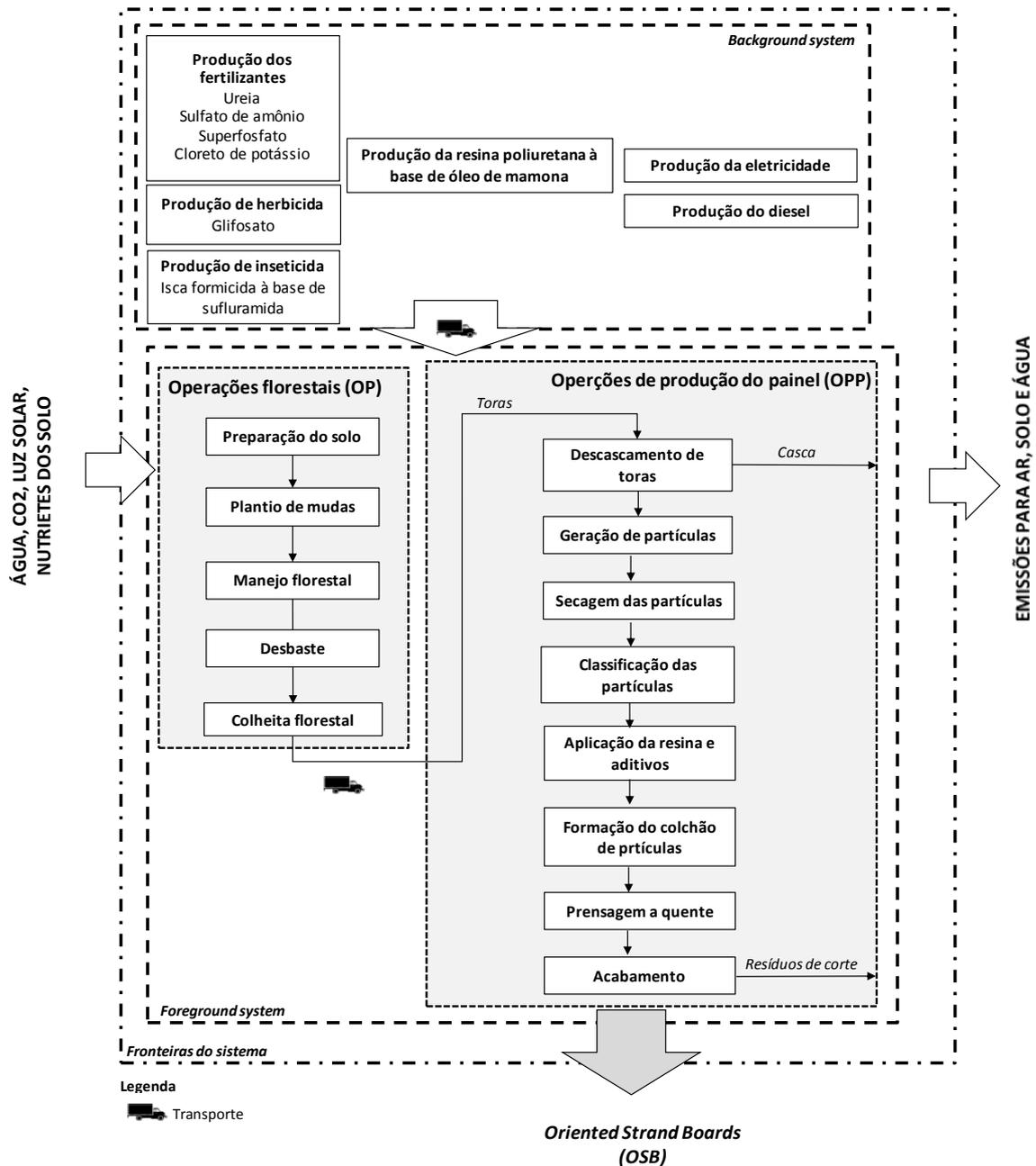
fábrica produtora de painel, e o gás de petróleo liquefeito (GPL) necessário para os transportes internos na fábrica de painéis); ii) a produção de produtos químicos exigidos no subsistema OF, tais como: fertilizantes minerais (ureia, sulfato de amônio, cloreto de potássio e superfosfato) e herbicidas (glifosato), bem como produtos químicos usados no subsistema OPP, como resina MDI, parafina e fungicida piretróide. Além disso, foram consideradas dentro dos limites do sistema, as atividades de transporte relacionadas a distribuição dos insumos da área florestal até a fábrica de OSB.

Para o agente desmoldante (utilizado durante a prensagem contínua dos painéis, com o objetivo de não ocorrer adesão entre o painel e a prensa), devido à ausência de dados, foi excluído da fronteira do sistema.

- Escala laboratorial

Com relação ao sistema de produto para os OSB produzidos em escala laboratorial (Figura 24), pode-se dizer também que vários processos foram incluídos dentro dos limites de sistema do *background system*. Dentre eles encontram-se: i) produção de insumos energéticos, como a produção de eletricidade na rede nacional brasileira e os combustíveis fósseis (diesel), utilizado pelos maquinários florestais nas etapas da OF; ii) produção de produtos químicos exigidos no subsistema OF, tais como: fertilizantes minerais (ureia, sulfato de amônio, cloreto de potássio e superfosfato) e herbicidas (glifosato). No que diz respeito à OPP, o único produto químico utilizado foi a resina poliuretana à base de óleo de mamona. Além disso, foram consideradas dentro dos limites do sistema as atividades de transporte relacionadas à distribuição dos insumos da área florestal até o LaMEM, local de produção dos painéis.

**Figura 24-** Fronteiras do sistema do ciclo de vida da produção OSB, em escala laboratorial, (perspectiva *cradle-to-gate*)



Em ambos os subsistemas analisados, operações florestais e operações de produção do painel, insumos classificados como entrada auxiliares como embalagens de produtos químicos (fertilizantes, resina, solventes etc.), foram excluídos do sistema. Segundo Silva (2012), em geral os resíduos gerados a partir dos insumos classificados como entradas auxiliares são resíduos sólidos, tratados e destinados por suas empresas produtoras.

Assim como nos estudos de González-Garcia (2014) e Silva (2012), os bens de capital como edifícios das unidades industriais, maquinários e equipamentos florestais e industriais

foram excluídos da fronteira do sistema. Apenas as atividades de preparo e manutenção de estradas foram consideradas, pois dentro do ciclo de cultivo da madeira de *Pinus* sp., em média 12 anos para este estudo, as estradas de acesso as áreas florestas são periodicamente reparadas ou reconstruídas. As principais máquinas utilizadas nesse processo de manutenção e reparo de estradas são retroescavadeira, motoniveladora e tratores.

Bens pessoais como alimentação e transporte dos funcionários, materiais de escritório etc também foram excluídos da avaliação, uma vez que a maioria dos estudos de ACV consultados na literatura nacional e internacional não os considera.

No estudo de ACV para os OSB produzidos em escala laboratorial, o consumo energético referente ao uso da balança analítica para pesagem das partículas e adesivo, e ao uso da iluminação do laboratório, não foi considerado, pois esse consumo é muito pequeno quando comparado ao dos demais equipamentos utilizados no processo produtivo do painel, como serra circular, serra fita, encoladeira e prensa. Além disso, a iluminação do laboratório é utilizada para realização de várias outras atividades, o que torna muito difícil a determinação deste consumo apenas para a fabricação de OSB.

Fronteira geográfica: Como fronteira geográfica deste estudo definiram-se as regiões Sul e Sudeste do Brasil, pois nelas se localizam a empresa produtora de OSB e o LaMEM, além das regiões onde estão as unidades fornecedoras de insumos que participam do ciclo de vida do OSB, principalmente o Nordeste, onde se encontram as principais empresas produtoras de fertilizantes. Para as informações obtidas de fontes secundárias (literatura, base de dados) a fronteira geográfica também estará relacionada à fonte destes dados.

Fronteira temporal: Com base no resultado das entrevistas realizada pelas empresas estipulou-se um prazo de validade de 5 anos para os resultados desta pesquisa. A validade dos dados foi limitada pelas atividades relacionadas às práticas silviculturais. A utilização de fertilizantes no preparo e na manutenção da floresta já se encontra em desuso por muitas empresas do ramo. Pesquisas (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2000; VOGEL et al., 2005) relatam que espécies de *Pinus* demonstram capacidade extraordinária de gerenciamento dos recursos nutricionais do solo, podendo a atividade de adubação do solo ser reduzida, ou até mesmo dispensada, sem afetar significativamente o crescimento da árvore. Assim, o impacto do uso de fertilizantes deve ser considerado para os plantios com idade superior a 10 anos e não para os novos.

Fronteira tecnológicas: Para as operações florestais, diferenças tecnológicas importantes foram constatadas. A empresa produtora da madeira de *Pinus* analisada para o desenvolvimento deste estudo, localizada no município de Ponta Grossa, estado do Paraná, ainda utiliza fertilizantes NPK em suas atividades florestais. Contudo, outras empresas do ramo florestal foram contatadas e relataram que, atualmente, dispensam o uso desses fertilizantes na produção de madeira de *Pinus*, por não ter efeitos significativos. Assim, ao final deste estudo foi efetuada análise dos impactos ambientais potenciais quando tais insumos não são utilizados na produção da madeira de *Pinus*.

Para os dados provenientes da literatura (dados secundários), a fronteira tecnológica esteve associada às fontes desses dados e no caso de fontes internacionais, os dados foram adaptados ao contexto brasileiro na tentativa de adequar a fronteira tecnológica.

#### 4.2.1.3 Procedimentos de alocação

No estudo de ACV realizado a multifuncionalidade não foi verificada, o que resultou na não adoção de quaisquer procedimentos de alocação.

#### 4.2.1.4 Requisitos na qualidade dos dados

A seguir encontram-se detalhados as formas de obtenção dos dados para os sistemas de produto avaliado (industrial e laboratorial).

### **Produção em escala industrial**

Para a produção do painel em escala industrial, os dados de inventário correspondentes às operações de produção do painel (OPP) consistiram em dados médios de produção para o ano de 2015, obtidos por medições “*in loco*” (dados primários), com funcionários da empresa produtora de OSB.

As distâncias médias de transporte correspondentes à entrega das entradas (insumos utilizados na produção do painel) até portão da fábrica, e a entrega das entradas referentes aos insumos utilizados na produção florestal, estão apresentadas na Tabela 9. Com relação às distâncias de entrega das entradas relacionadas aos insumos de produção do painel, estas foram calculadas com base nas informações fornecidas pelos funcionários da empresa. Já as distâncias referentes a entrega das entradas dos insumos utilizados na produção florestal, devido à falta de

dados, foram calculadas com base nas distâncias das principais empresas fornecedoras desses produtos no país, como apresentado no estudo de Silva (2012).

Para a distribuição dos fertilizantes à base de N (ureia e sulfato de amônio), assumiu-se a distância média ponderada das principais empresas produtoras no país, citadas por Ribeiro (2006), localizadas no Estado da Bahia, cidades de Laranjeiras e Camaçari (ureia), e Camaçari e Candeias (sulfato de amônio). Para o fertilizante à base de P (superfosfato), a empresa considerada no cálculo da distância está localizada em Luís Eduardo Magalhães, Bahia. Como citado por Monteiro (2008), é uma das maiores produtoras de fertilizantes à base de P no país. Por fim, para o transporte do fertilizante à base de K, cloreto de potássio, e do herbicida glifosato, assim como no estudo de Silva (2012), foram consideradas as cidades de Rosário do Catete, no Sergipe, e Camaçari na Bahia, respectivamente.

Assumiu-se que todas as atividades de transporte foram realizadas por caminhões com carga útil superior a 32 toneladas - categoria 5 (SPIELMANN et al., 2007), com exceção da resina MDI, importada da Alemanha e transportada por navio. Além disso, para o cálculo das distâncias, assumiu-se que o plantio de *Pinus* encontra-se na região de Ponta Grossa, estado do Paraná.

**Tabela 9-** Distâncias de transporte para a produção de OSB em escala industrial

<b>Subsistemas</b>	<b>Insumos</b>	<b>Distância (km)</b>
OPP	Madeira	150
OPP	Resina MDI*	9000
OPP	Parafina	100
OPP	Inseticida piretróide	100
OF	Ureia	2082
OF	Sulfato de amônio	2419
OF	Superfosfato	1791
OF	Cloreto de potássio	2670
OF	Glifosato	2403

\* Importado da Alemanha e transportado por navios.

Abreviações: OPP: Operações de produção do painel; OF: Operações florestais; P: fósforo; K: potássio; MDI: Meti difenil de isocianato.

Com relação ao *background system*, os dados de inventário foram coletados da literatura. Portanto, os dados relacionados à produção de produtos químicos requeridos no subsistema OPP (resina MDI, parafina e inseticida piretróide) e requeridos para o sistema OF (dados relacionados a produção de fertilizantes minerais como a ureia e sulfato de amônio (fertilizante a base de N), superfosfato (fertilizante a base de P) e cloreto de potássio (fertilizante a base de K), e também do

herbicida glifosato) foram retirados de Althaus et al. (2007). No tocante à produção de eletricidade brasileira e combustíveis fósseis (diesel e GLP), os dados de inventário correspondentes foram obtidos de Dones et al. (2007).

Para a fabricação do OSB fazem-se necessários eletricidade e calor. A energia elétrica utilizada na produção dos painéis é totalmente fornecida pela rede nacional brasileira, sendo consumida por todas as máquinas utilizadas no sistema de produção. No que diz respeito ao calor, este é produzido no local (própria indústria) em uma unidade de geração de calor, onde os resíduos de biomassa (casca do processo do descascamento de toras, finos do processo de classificação das partículas e outros resíduos) são queimados. O calor gerado é utilizado no processo de secagem das partículas e na unidade de prensagem.

Combustíveis fósseis, como o diesel e o GPL, são utilizados, respectivamente, pelos tratores para o transporte das toras, desde o local de pátio de armazenagem até a máquina de descascar toras, e pelas máquinas empilhadoras, no processo de acabamento dos painéis.

No que se refere às saídas para o ambiente, derivadas de atividades relacionadas ao subsistema OPP, foram considerados dados primários e, quando os dados de emissão não estavam disponíveis, essas foram estimadas com base na literatura. Assim, as emissões referentes à combustão dos combustíveis fósseis, como o diesel e o GPL utilizados no transporte interno da indústria, foram obtidas de Spielmann et al. (2007) e IDEMAT (2001), respectivamente. No que se refere à combustão de casca e resíduos de biomassa, as emissões foram retiradas de Doka (2009). No tocante aos processos de secagem das partículas e prensagem a quente, o MDI e os compostos orgânicos voláteis (COV) são emitidos para a atmosfera. Informações sobre esses fatores de emissões durante as etapas de secagem das partículas e prensagem foram obtidas do estudo de Kline (2010).

### **Produção em escala laboratorial**

Para a produção do painel em escala laboratorial, os dados de inventário correspondentes às operações de produção do painel (OPP) consistiram em dados obtidos através da medição “*in loco*”. Os dados referentes à madeira e a resina, foram coletados por intermédio de balanço de massa. Neste caso, tudo que entrou no sistema (matéria-prima e insumos) e tudo que saiu do sistema (produtos e resíduos) foram convertidos em massa e mensurados.

O consumo energético foi medido com o auxílio de um analisador de qualidade de energia, FLUKE 435, ou seja, foi determinado o consumo energético de cada equipamento utilizado em laboratório para a produção do OSB: serra circular, serra fita horizontal, gerador

de partículas, compressor e encoladeira adaptada, e por último, a prensa. A Figura 25 ilustra o equipamento utilizado para análise do consumo energético.

O consumo energético referente ao uso da balança analítica na pesagem das partículas de madeira e da resina, e à iluminação do laboratório não foi computado neste estudo.

As distâncias médias de transporte correspondentes à entrega das entradas (madeira, e resina) até ao LaMEM, bem como a entrega das entradas (fertilizantes e herbicidas) para a realização das operações florestais estão apresentados na Tabela 10.

**Figura 25-** Medição de energia da produção do OSB em laboratório. a) Analisador de qualidade de energia FLUKE 435. b) Análise do consumo de energia da serra circular



(a)

(b)

Fonte: Próprio autor.

**Tabela 10-** Distâncias de transporte para a produção de OSB em escala laboratorial

Subsistemas	Insumos	Distância (km)
OPP	Madeira de desbaste	150
OPP	Resina PU- mamona	5,1
OF	Ureia	1482
OF	Sulfato de amônio	1819
OF	Superfosfato	1191
OF	Cloreto de potássio	2070
OF	Glifosato	1803

Com relação às distâncias de entrega das entradas relacionadas aos insumos de produção

do painel, estas foram calculadas diretamente, ou seja, foi utilizada a distância entre a empresa produtora do insumo até o LaMEM. As distâncias referentes à entrega das entradas dos insumos utilizados na produção florestal, devido à falta de dados, foram calculadas com base nas distâncias das principais empresas fornecedoras desses produtos no país, como apresentado por Silva (2012), citado no item 3.4.3.4 no tópico produção industrial. Assumiu-se que todas as atividades de transporte foram realizadas por caminhões com carga útil superior a 32 toneladas - categoria 5 (SPIELMANN et al., 2007).

No que diz respeito a distância de transporte das toras de madeira, ou seja, da região florestal até o LaMEM, decidiu-se por adotar a distância média entre as áreas florestais e a indústria, como relatado por funcionários da indústria brasileira de OSB.

Com relação ao *background system*, os dados de inventário foram coletados da literatura, e as fontes dos dados relacionados à produção de produtos químicos, eletricidade brasileira e combustíveis fósseis foram relatados no item 3.4.3.4 a (produção industrial). Para a resina PU-mamona, a empresa produtora, não revelou os insumos, procedimentos realizados, e resíduos gerados para produzir tal resina. Sendo assim, foi impossível realizar o ICV e calcular os impactos ambientais potenciais referentes à produção de parte da resina, o polioli, componente derivado do óleo de mamona. Para o outro componente da resina PU-mamona, o isocianato, os dados foram retirados de Althaus et al. (2007).

A energia elétrica utilizada na produção dos painéis é totalmente fornecida pela rede nacional brasileira, sendo consumida por quase todas as máquinas utilizadas no sistema de produção, exceto pela máquina que realiza pré-prensagem do painel.

No que se refere às saídas para o ambiente, derivadas de atividades relacionadas ao subsistema OPP, devido à falta de equipamentos, não foi possível a medição “*in loco*” para obtenção de dados primários. Por isso, foram considerados os valores de emissão estimados na literatura. As principais emissões para atmosfera decorrentes da produção do OSB em laboratório são o MDI e os compostos orgânicos voláteis (COV), derivados dos processos de prensagem a quente do painel e secagem das partículas. Informações sobre esses fatores de emissões foram obtidas de Kline (2010).

Ainda para o sistema de produção laboratorial, considerou-se que todos os resíduos gerados (madeira, painel serrado etc.) são destinados ao aterro sanitário da cidade.

#### 4.2.1.5 Categorias de impacto, método de avaliação de impacto

Como descrito no item 3.5.1.5 foram consideradas 10 categorias de impacto selecionadas para o método ReCiPe (2009): Mudanças climáticas (MC), Depleção da camada de ozônio (DO), Acidificação terrestre (AT), Eutrofização de água doce (EA), Eutrofização Marinha (EM), Toxicidade Humana (TH), Formação de Oxidantes Fotoquímicos (FOF), Ecotoxicidade Terrestre (ET), Ecotoxicidade de água doce (ETa) e Depleção fóssil (DF).

#### 4.2.2 Análise do inventário do ciclo de vida

Os inventários realizados neste estudo estão apresentados nas Tabelas 11 e 12. No inventário da Tabela 11 estão expostos os insumos e emissões para a produção da madeira de *Pinus*, enquanto que os insumos e emissões referentes ao processo de fabricação do OSB encontram-se na Tabela 12. Os inventários foram montados estabelecendo-se balanços de massa e energia conforme os procedimentos comumente adotados em estudos do ciclo de vida encontrados na literatura, nas recomendações das normas de ACV, como a ABNT NBR 14140 e 14144 (2009), utilizadas como base neste estudo. Observa-se, nas Tabelas 11 e 12, que as entradas estão divididas em entradas da tecnosfera e entradas do meio ambiente. Já os fluxos de saída foram classificados em saídas para a tecnosfera (produto intermediário) e saídas para o meio ambiente, como as emissões ao ar, água (efluentes) e solo (resíduos sólidos).

As quantidades referentes aos fluxos de entradas e saídas apresentadas nas Tabelas 11 e 12 foram calculadas com base na unidade funcional deste estudo, ou seja, 1 m<sup>3</sup> de OSB. Para a produção de 1m<sup>3</sup> de OSB, para ambas as escalas estudadas (laboratorial e industrial) foi considerado consumo médio de 1,7 m<sup>3</sup> de madeira (com casca), equivalente a 0,0035 ha de floresta de *Pinus*. Nos cálculos da área de floresta de *Pinus* necessária para a produção de OSB, considerou-se a produtividade de 40,1 m<sup>3</sup>/ha.ano, a partir dos dados da ABRAF (2013). Além disso, para o cálculo do transporte (caminhão) referente às entradas da tecnosfera considerou-se somente o transporte do herbicida e dos fertilizantes até o local do plantio.

Ainda na Tabela 11, podem ser vistas as operações florestais referentes à produção de *Pinus* sp. para fabricação do OSB em escala industrial (OP<sub>i</sub>) e para a escala laboratorial (OP<sub>l</sub>). A principal diferença entre ambas é que a primeira não possui trato silvicultural (realização de desbaste, desrama) para aumento de produtividade das árvores e o corte ocorre aos 12 anos de idade, enquanto que, na segunda, são realizados dois desbastes, aos 4 e aos 12 anos de idade, no qual são removidos 94,6 e 174,6 m<sup>3</sup> de madeira, respectivamente, visando o aumento da

produtividade da árvore. Além disso, o corte final é realizado aos 20 anos. Todavia, para o cálculo dos dados do inventário foi considerada apenas a madeira proveniente dos desbastes, uma vez que a resultante do corte final não é utilizada como matéria-prima para fabricação de painéis. O cálculo da quantidade de CO<sub>2</sub> absorvida foi baseada nas recomendações de *Forest Absorbing Carbon Dioxide Emission* (1993), Reis et al. (1994), Silva (2012). Por fim, cabe ressaltar que a cadeira produtiva da isca formicida não foi incluída no sistema devido à ausência de dados.

Com relação ao cálculo dos dados do inventário para o subsistema OPP<sub>1</sub>, consideraram-se as quantidades de insumos utilizados na fabricação da condição experimental C2 (proporção de 1,25:0,75 entre os componentes polioli e pré-polímero da resina poliuretana à base de óleo de mamona), uma vez que esta se apresentou como melhor alternativa por utilizar menor quantidade do componente isocinato e apresentar propriedades compatíveis com os requisitos da norma EN 300 (2006) para aplicações estruturais.

A energia térmica considerada na Tabela 12 é proveniente da queima de resíduos de biomassa, tais como casca, serragem e resíduos de corte do painel. Tal energia é utilizada no processo de secagem das partículas e também no aquecimento do óleo utilizado para aquecer a prensa.

**Tabela 11-** Dados de inventário, correspondentes à cultura de *Pinus*, a fim de produzir 1m<sup>3</sup> de tipo OSB “home”

	Quantidade		Unidade
	OF <sub>i</sub>	OF <sub>i</sub>	
<b>ENTRADAS DA TECNOSFERA</b>			
<b>Materiais</b>			
Mudas de <i>Pinus</i>	25	25	unidades
<b>Herbicida</b>			
Glifosato	271	271	g
<b>Inseticida</b>			
Isca formicida a base de sulfluramida*	480	480	g
<b>Fertilizantes</b>			
Ureia	142	142	g
Sulfato de amônio	65	65	g
Superfosfato	1541	1541	g
Cloreto de potássio	517	517	g
<b>Combustível fóssil</b>			
Diesel	4110	2112	g
<b>Transporte</b>			
Caminhão	474	447	t·km
<b>ENTRADAS DO MEIO AMBIENTE</b>			
Água	13	13	L
CO <sub>2</sub>	1403	748	kg
<b>SAÍDAS PARA A TECNOSFERA</b>			
<b>Produto</b>			
Madeira de <i>Pinus</i>	690	690	kg
<b>SAÍDAS PARA O MEIO AMBIENTE</b>			
<b>Emissões para o ar</b>			
<i>Da combustão do diesel</i>			
NMVOC	73	37	g
NO <sub>x</sub>	615	308	g
CO	186	93	g
CO <sub>2</sub>	35	18	kg
SO <sub>2</sub>	29	15	g
CH <sub>4</sub>	26	13	g
Benzeno	31	16	g
Partículas	97	48	g
Cádmio	76	38	g
Cromo	76	38	g
Cobre	76	38	g
N <sub>2</sub> O	26	13	g
Níquel	76	38	g
Zinco	76	38	g
Benzo(a)pireno	31	16	g
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos -HAP	46	23	g
Calor	518	260	kg
Amônia	23	11	g
Selênio	76	38	g
<i>Da aplicação de fertilizantes</i>			
Ureia	100	94	g
<i>Da aplicação do herbicida glifosato</i>			
Partículas de glifosato	24	23	g
<b>Emissões para o solo</b>			
<i>Da aplicação do herbicida glifosato</i>			
Partículas de glifosato	202	190	g
<b>Emissões para a água</b>			
<i>Da aplicação do herbicida glifosato</i>			
Partículas de glifosato	24	23	g
<i>Da aplicação de fertilizantes</i>			
Fosfato	1,3	1,2	g

**Tabela 12-** Dados de inventário global (perspectiva *gate-to-gate*) por unidade funcional (1 m<sup>3</sup> de OSB tipo *home*) correspondente ao subsistema de operação de produção de painel para escala industrial

	Quantidade		Unidade
	OPP <sub>i</sub>	OPP <sub>1</sub>	
<b>ENTRADAS DA TECNOSFERA</b>			
<b><i>Materiais</i></b>			
Madeira de <i>Pinus</i> spp.	690	690	kg
Resina MDI	15,2	-	kg
Resina PU-mamona <sup>a</sup>	-	81	kg
Parafina	7	-	kg
Termicida Piretróide	0,96	-	kg
Agente desmoldante	0,70	-	kg
<b><i>Combustível fóssil</i></b>			
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	0,18	-	kg
Diesel	0,98	-	kg
<b><i>Energia</i></b>			
Térmica	6131	-	MJ
Elétrica	497	2 538	MJ
<b><i>Transporte</i></b>			
Caminhões	38	-	t·km
Navio	14	-	t·km
<b>ENTRADAS DO MEIO AMBIENTE</b>			
Água	0,29	-	kg
<b>SAÍDAS PARA A TECNOSFERA</b>			
<b><i>Produto</i></b>			
Oriented Strand Board (OSB)	1	1	m <sup>3</sup>
<b><i>Resíduos para tratamento</i></b>			
Cinza <sup>c</sup>	38	-	kg
<b><i>Resíduos para aterro</i></b>			
Resíduos de biomassa <sup>b</sup>	-	140	kg
<b>SAÍDAS PARA O MEIO AMBIENTE</b>			
<b><i>Emissões para o ar</i></b>			
<i>Da etapa de geração de calor</i>			
Partículas	3,8	-	kg
CO	4,6	-	kg
CO <sub>2</sub>	1500	-	kg
NO <sub>x</sub>	1,7	-	kg
SO <sub>2</sub>	0,19	-	kg
CH <sub>4</sub>	0,16	-	kg
Vapor	65	-	g
<i>Da etapa de secagem das partículas e prensagem a quente</i>			
VOC	4,2	4,2	kg
MDI	32	64	g
<i>Do transporte interno</i>			
CO	5,8	-	g
CO <sub>2</sub>	3056	-	g
NO <sub>x</sub>	38	-	g
VOC	0,98	-	g
SO <sub>2</sub>	1,0	-	g
NMVOC	342	-	g
Partículas (< 2,5 µm)	4,8	-	g

<sup>a</sup> Resina 81 kg de resina PU-mamona, sendo 30 kg de pré-polímero e 51 kg de polioli. Do descasamento de toras, classificação das partículas e resíduos de corte; <sup>b</sup> Resíduos como casca, serragem e provenientes do corte final do painel; <sup>c</sup> Da unidade de geração de calor para a unidade de compostagem.

Como pode ser observado na Tabela 11, a quantidade de CO<sub>2</sub> absorvido durante o crescimento da árvore do reflorestamento destinado exclusivamente para produção de painel é cerca de 47% superior em relação a quantidade absorvida pelas árvores provenientes de atividades de desbastes. Como no primeiro desbaste as árvores são cortadas com 4 anos, e é removido 59% do plantio inicial, pouca quantidade de CO<sub>2</sub> foi sequestrado pelas plantas durante esse período. No segundo desbaste, aos 12 anos, é removido aproximadamente 36% das árvores remanescentes, sendo a quantidade de CO<sub>2</sub> absorvido proporcional a área removida.

Ainda pela Tabela 11, observa-se que a quantidade de diesel consumida pelo subsistema OF<sub>i</sub> é superior em 50%, em relação à OF<sub>1</sub>. O menor consumo de diesel também está relacionado a utilização da madeira de desbaste, pois o volume de árvore removido durante essa atividade de manejo é menor, sendo 94,6 e 160,4 m<sup>3</sup> a quantidade removida no primeiro e no segundo desbaste respectivamente, enquanto que no subsistema OF<sub>i</sub> são removidos 481,2 m<sup>3</sup> de madeira no corte raso, aos 12 anos de idade. Vale destacar que para OF<sub>1</sub> o segundo desbaste também é realizado aos 12 anos de idade do plantio, todavia, apenas 36% da área reflorestada é removida. Em consequência do menor volume de madeira cortado, menor é a quantidade de hora trabalhada pelas máquinas florestais e, conseqüentemente, menor a quantidade de diesel consumido e menor as emissões provenientes da combustão desse combustível fóssil.

### **4.2.3 Avaliação dos impactos do ciclo de vida dos OSB**

A seguir estão apresentados os impactos ambientais potenciais para o OSB, considerando as 10 categorias de impacto selecionadas para o método ReCiPe (2009): Mudanças climáticas (MC), Depleção da camada de ozônio (DO), Acidificação terrestre (AT), Eutrofização de água doce (EA), Eutrofização Marinha (EM), Toxicidade Humana (TH), Formação de Oxidantes Fotoquímicos (FOF), Ecotoxicidade Terrestre (ET), Ecotoxicidade de água doce (ETa) e Depleção fóssil (DF).

#### **4.2.3.1 Impactos ambientais potenciais associados ao subsistema Operação Florestal**

A Tabela 13 mostra os impactos ambientais potenciais associados aos subsistemas Operações Florestais para produção do OSB em escala laboratorial (OF<sub>i</sub>) e industrial (OF<sub>1</sub>), obtidos para cada uma das dez categorias de impacto consideradas. Para o cálculo dos impactos referentes à OF<sub>1</sub> foi realizada a média dos impactos alocados do primeiro e do segundo desbastes. A utilização da média se justifica pelo fato de não se saber a quantidade exata de

madeira proveniente de cada desbaste florestal.

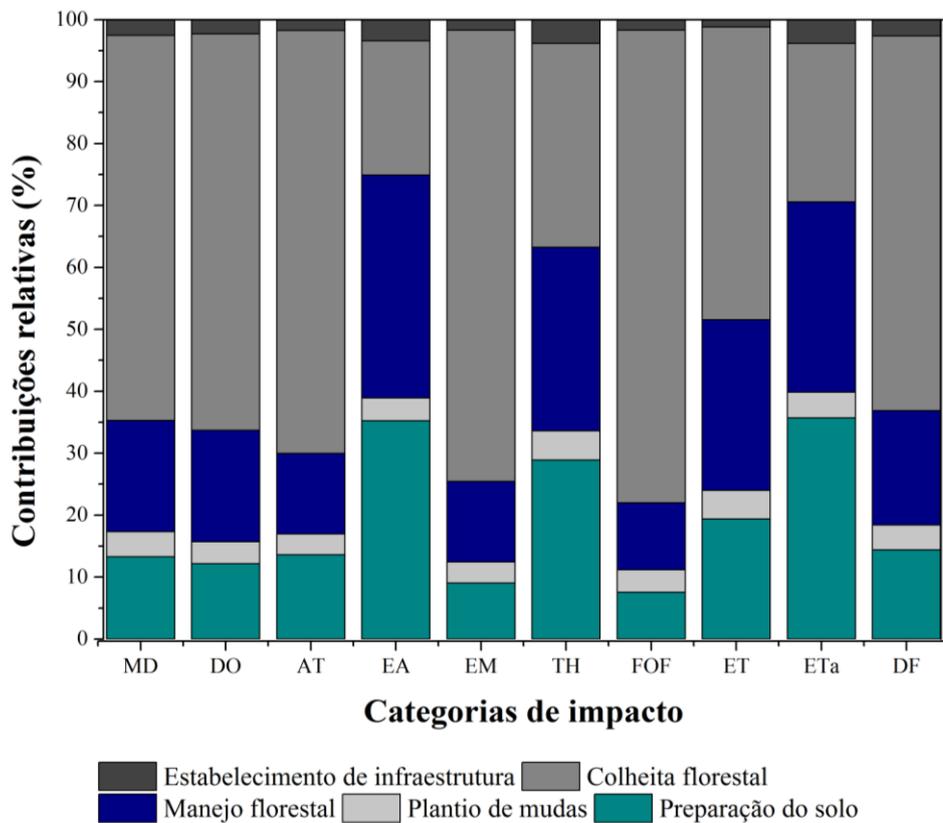
**Tabela 13-** Impactos ambientais potenciais para produção da madeira do gênero *Pinus* para 1 m<sup>3</sup> de OSB

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>OF<sub>i</sub></b>	<b>OF<sub>i</sub></b>
Mudança climática - MC	kg CO <sub>2</sub> eq	6,3	14,5
Depleção da camada de ozônio - DO	kg CFC-1 eq	9,3E-07	2,2E-06
Acidificação terrestre - AT	kg SO <sub>2</sub> eq	4,4E-02	0,11
Eutrofização de água doce - EA	kg P eq	2,6E-03	3,4E-03
Eutrofização marinha - EM	kg N eq	2,3E-03	6,4E-03
Toxicidade humana - TH	kg 1,4-DCB eq	2,75	4,1
Formação de oxidantes fotoquímicos - FOF	kg NMVOC eq	5,6E-02	0,2
Ecotoxicidade terrestre - ET	kg 1,4-DCB eq	1,0E-03	1,8E-03
Ecotoxicidade de água doce - ETa	kg 1,4-DCB eq	4,2E-02	8,6E-01
Depleção fóssil - DF	kg oil eq	2,2	4,9

Como pode ser observado na Tabela 13, as maiores contribuições para os impactos são atribuídas à OF<sub>i</sub>, uma vez que toda a área plantada do gênero *Pinus* é destinada a fabricação do painel. Os índices de superioridade do subsistema OF<sub>i</sub> variam desde 32%, para a categoria de impacto Toxicidade Humana (TH), até 67% para Formação de oxidantes fotoquímicos (FOF). Como tais diferenças estão associadas principalmente ao menor consumo de combustível fóssil pelas máquinas florestais, uma vez que o volume de madeira cortado durante a atividade de desbaste é menor, as maiores diferenças nos impactos entre os subsistemas OF<sub>i</sub> e OF<sub>1</sub> estarão presentes nas categorias onde o alto consumo de diesel exerce bastante influência como MC (diferença de 56%), DO (57%), AT (61%), EM (65%), POF (67%), ETa (51%) e DF (55%).

A seguir, na Figura 26, estão apresentadas as contribuições para as categorias de impacto consideradas para avaliação por etapas envolvidas na cadeia de produção da madeira de *Pinus*. Nesta etapa considerou-se apenas a análise de contribuição para o *Pinus* cultivado para obtenção de madeira para fabricação de painel, ou seja, corte final de 12 anos, uma vez que o subsistema OP<sub>i</sub> teve maiores contribuições e se constitui como um cenário real utilizado pelas indústrias brasileiras.

**Figura 26** - Contribuições para o perfil ambiental correspondente ao sistema brasileiro de produção de madeira de *Pinus*, considerando as atuais práticas florestais



Fonte: Próprio autor.

Em relação ao perfil ambiental global (Figura 26), as maiores contribuições da etapa de Preparação do solo foram nas categorias de impacto ETa (35,7%), EA (35,2 %) e TH (28,8%), e estão principalmente associadas ao uso do fertilizante superfosfato ( $P_2O_5$ ) no solo. Durante o processo de fabricação de tal fertilizante, fosfato é emitido para a atmosfera contribuindo para EA. Os impactos no ETa e TH estão relacionados com as emissões de níquel e cobre na água durante a produção de ácido sulfúrico, componente utilizado como matéria-prima para produzir o fertilizante superfosfato.

Comparado com as outras etapas da Operação florestal (Preparação do solo, Manejo florestal e Colheita Florestal e Estabelecimento de infraestrutura), a etapa Plantio de mudas, que envolve processos como plantio das mudas, irrigação e replantio, não contribui significativamente para os impactos associados às categorias analisadas neste estudo. Para o perfil ambiental global (Figura 26), esta etapa teve contribuições relativas que variaram de 3,3% para AT a 4,7% para TH. Na etapa plantio de mudas, para todas as categorias de impacto analisadas, mais de 40% dos potenciais de impacto estão associados ao processo de plantio. Em

uma avaliação detalhada, a produção do diesel consumido pelo trator com o disco rígido acoplado, utilizado na plantação das mudas, é o principal responsável por esses impactos. Ainda é importante destacar que o maior tempo de trabalho no processo de plantação ( $8,5 \text{ h}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) em relação ao processo de replantação ( $4,2 \text{ h}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), é o fator determinante para as maiores contribuições nos potenciais impactos nas categorias avaliadas.

De acordo com a Figura 26, para o perfil ambiental global, o subsistema de Manejo florestal teve uma contribuição que variou de 10,8% (FOF) para 35,9% (EA). Em todas as categorias analisadas, mais de 44% dos impactos são derivados do processo de capina química. Em termos de MC, DO, AT, EM, TH, FOF, ET, e DF, os impactos estão associados ao uso (e, portanto, à produção) de diesel pelo trator juntamente com o pulverizador necessário a esta atividade florestal. Em relação à EA, as contribuições da etapa de Manejo florestal estão relacionadas com a emissão de cloro e ácido cloroacético ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{ClO}_2$ ) na atmosfera, ambos derivados da produção do herbicida glifosato.

No que diz respeito à Colheita florestal, etapa que envolve os processos de colheita, extração e carregamento das toras em caminhões, há contribuição notável em todas as categorias de impacto analisadas neste estudo, com índices variando de 21,6% (EA) a 76,2% (FOF). A colheita de árvores é realizada por colheitadeira (*harvester*), enquanto que a extração das toras de madeira da área de corte para a região próxima a estrada é realizada por um *forwarder*. Ambas as máquinas requerem consumo significativo de diesel por unidade funcional ( $500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  e  $290 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  para o *harvester* e o *forwarder*, respectivamente). Na verdade, 89% do total de combustível necessário durante todo o ciclo de vida da produção do *Pinus* estão associados a ambos os processos, sendo o *harvester* e o *forwarder* responsáveis por aproximadamente 56 e 33%, respectivamente, do total de diesel consumido na etapa de Colheita florestal.

As maiores contribuições da etapa Colheita florestal para as categorias de impacto MC, AT, EM e FOF derivam das emissões de produção e combustão do diesel utilizado pelo *harvester* (contribuição para potencial de impacto superior a 49% para as categorias citadas) e do *forwarder* (contribuição para potencial de impacto superior a 30% para tais categorias). As emissões de combustão mais importantes que contribuem para estas categorias de impacto são:  $\text{CO}_2$  (MC),  $\text{SO}_2$  (AT),  $\text{NO}_x$  (EM) e  $\text{NO}_x$  (FOF). Em relação à DO e DF, as contribuições da Colheita florestal estão relacionadas com a produção do diesel utilizado nas máquinas florestais, (principalmente, *harvester* e *forwarder*). O impacto na DO está relacionado com a emissão Halon 1301 do processo de fabricação de diesel. Em termos de DF, o impacto está relacionado com o requisito de petróleo bruto no processo de produção de diesel. Em relação ao TH, 43%

dos impactos estão associados ao processo de colheita das árvores.

Em relação à etapa Estabelecimento de infraestrutura, as contribuições para o perfil ambiental global variam de 1,2% (ET) a 3,8% (ETa). De acordo com a Figura 24, mais de 52% dos impactos estão relacionados com a manutenção da estrada. A manutenção rodoviária e as atividades relacionadas à construção rodoviária requerem os mesmos maquinários. No entanto, a alta frequência de manutenção rodoviária (1,2 h·ha<sup>-1</sup>) em relação às atividades de construção rodoviária (0,7 h·ha<sup>-1</sup>) contribui com maiores impactos nas categorias avaliadas.

#### 4.2.3.1.1 Análise de cenário - Não aplicação de fertilizantes nos tratos silviculturais do *Pinus*

Como já mencionado no item 3.5.4 as atividades relacionadas às práticas silviculturais do gênero *Pinus* estão mudando no país. A utilização de fertilizantes no preparo e na manutenção da floresta já se encontra em desuso por muitas empresas do ramo. Sendo assim, foi realizada uma análise de cenário, no qual não foi considerada a utilização de fertilizantes nas operações florestais. A seguir, na Tabela 14, encontram-se os impactos ambientais potenciais para a produção da madeira do gênero *Pinus* sem a utilização de fertilizantes.

**Tabela 14** - Impactos ambientais potenciais do gênero *Pinus* sem a utilização de fertilizantes nas práticas silviculturais

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>OP<sub>i</sub></b>	<b>Redução (%)</b>	<b>OP<sub>i</sub></b>	<b>Redução (%)</b>
MC	kg CO <sub>2</sub> eq	4,2	33,3	12,3	15,3
DO	kg CFC-11 eq	6,6E-07	29,1	1,9E-06	13,0
AT	kg SO <sub>2</sub> eq	2,7E-02	37,0	9,5E-02	15,2
EA	kg P eq	1,4E-03	46,4	2,1E-03	37,7
EM	kg N eq	1,6E-03	27,2	5,7E-03	10,1
TH	kg 1,4-DCB eq	1,5	45,8	2,74	32,6
FOF	kg NMVOC eq	4,2E-02	24,0	1,6E-01	8,2
ET	kg 1,4-DCB eq	6,1E-03	6,6	1,4E-03	24,6
ETa	kg 1,4-DCB eq	3,2E-02	53,9	6,1E-02	39,5
DF	kg oil eq	1,5	33,3	4,1	15,8

De acordo com a Tabela 14, a não aplicação de fertilizantes nos tratos silviculturais do gênero *Pinus* resultou em maiores reduções nos impactos ambientais potenciais para a categoria

ETa, de 53,9% para o subsistema OP<sub>1</sub> e 39,5 % para OP<sub>i</sub>. Tal resultado era esperado, uma vez que o uso de fertilizantes, sobretudo o superfosfato (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), contribui altamente nas categorias ETa, EA e TH e, conseqüentemente, tais reduções ocorreram principalmente nas etapas de Preparação do solo e Manejo florestal,

#### 4.2.3.2 Impactos ambientais potenciais associados ao subsistema Operação de produção de painel

A Tabela 15 mostra os impactos ambientais potenciais associados aos subsistemas de Operação de produção de OSB em escala laboratorial (OPP<sub>1</sub>) e industrial (OPP<sub>i</sub>), obtidos para cada uma das dez categorias de impacto consideradas neste estudo. Vale ressaltar que nesses valores estão inseridos também os impactos referentes aos subsistemas de operação florestal.

**Tabela 15 - Impactos ambientais potenciais para produção de 1 m<sup>3</sup> de OSB em escala laboratorial e industrial**

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>OPP<sub>1</sub></b>	<b>OPP<sub>i</sub></b>
Mudança climática - MC	kg CO <sub>2</sub> eq	264	157
Depleção da camada de ozônio - DO	kg CFC-11 eq	8,7E-06	1,0E-05
Acidificação terrestre - AT	kg SO <sub>2</sub> eq	9,3E-1	1,9
Eutrofização de água doce - EA	kg P eq	1,1E-02	1,5E-02
Eutrofização marinha - EM	kg N eq	3,6E-02	7,9E-02
Toxicidade humana - TH	kg 1,4-DCB eq	20,5	23
Formação de oxidantes fotoquímicos - FOF	kg NMVOC eq	8,0E-01	2,0
Ecotoxicidade terrestre - ET	kg 1,4-DCB eq	3,8E-02	3,1E-02
Ecotoxicidade de água doce - ETa	kg 1,4-DCB eq	6,0E-01	6,8E-01
Depleção fóssil - DF	kg oil eq	103	56

Pela Tabela 15, observa-se que, em duas das dez categorias analisadas, os impactos potenciais foram maiores para o subsistema OPP<sub>1</sub>, sendo elas: MC, ET e DF com índice de superioridade em relação ao subsistema OPP<sub>i</sub> de até 45,6% para as categorias de impacto DF e 18,4 para ET.

Para o subsistema OPP<sub>i</sub> observa-se pela Tabela 15 que, em relação ao subsistema OPP<sub>1</sub>, os maiores impactos ambientais potenciais ocorreram para as demais categorias DO, AT, EA, EM, TH, FOF e ETa, com índice de superioridade de até 54% para a categoria EM.

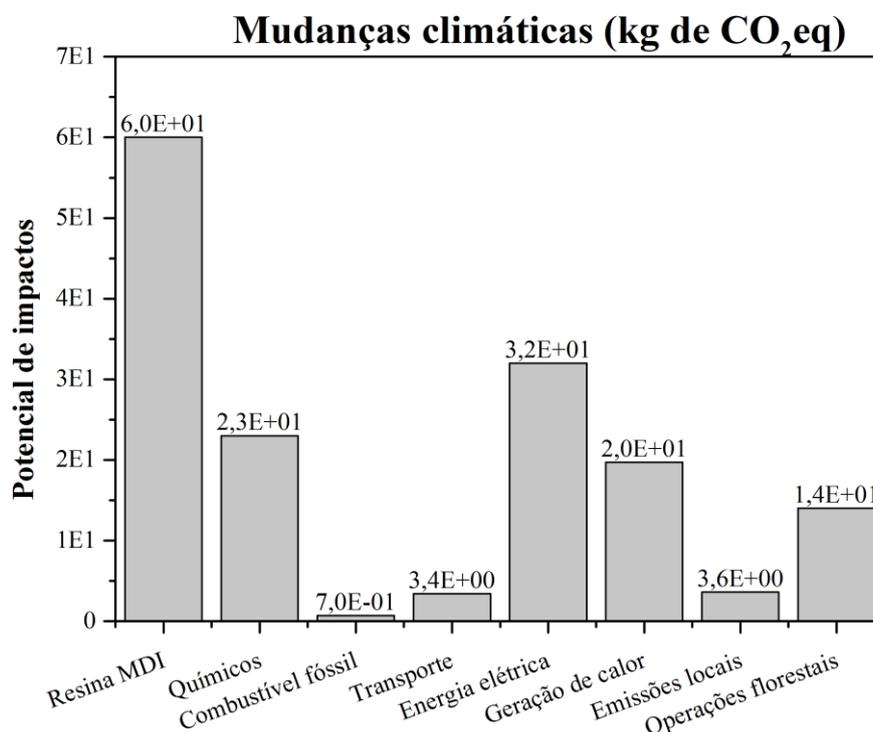
Para melhor visualização e interpretação dos impactos relacionados às operações de

produção do painel em ambas as escalas, os resultados globais foram estratificados para cada categoria de impacto. Para facilitar a interpretação, alguns aspectos ambientais foram agrupados. Para o subsistema OPP<sub>i</sub>, os químicos correspondem ao inseticida piretróide e a parafina; combustível fóssil é referente ao diesel e ao GLP, ambos utilizados no transporte interno da fábrica; transporte refere-se ao transporte de todas as matérias-primas utilizadas na fabricação do OSB, desde a fábrica (onde são produzidas) até o portão de entrada da fábrica de OSB; emissões locais referem-se às substâncias emitidas derivadas do processo de secagem das partículas *strands* e prensagem do painel.

Cabe ressaltar que na produção do OSB em laboratório não há utilização de aditivos como a parafina e inseticida piretróide. A parafina é adicionada no processo de produção de painéis particulados com o objetivo de reduzir a higroscopicidade das partículas de madeira e melhorar a estabilidade dimensional do painel, enquanto que o inseticida fornece maior proteção contra o ataque de organismos xilófagos. A utilização da resina PU-mamona dispensa a adição de químicos, conferindo estabilidades dimensionais compatíveis a até superiores aos exigidos por norma (BERTOLINI, 2012; FERRO, 2013; MACEDO et al., 2016, NASCIMENTO et al., 2015; SOUZA, 2012; VARANDA, 2012).

#### 4.2.3.2.1 Mudança Climática (MC)

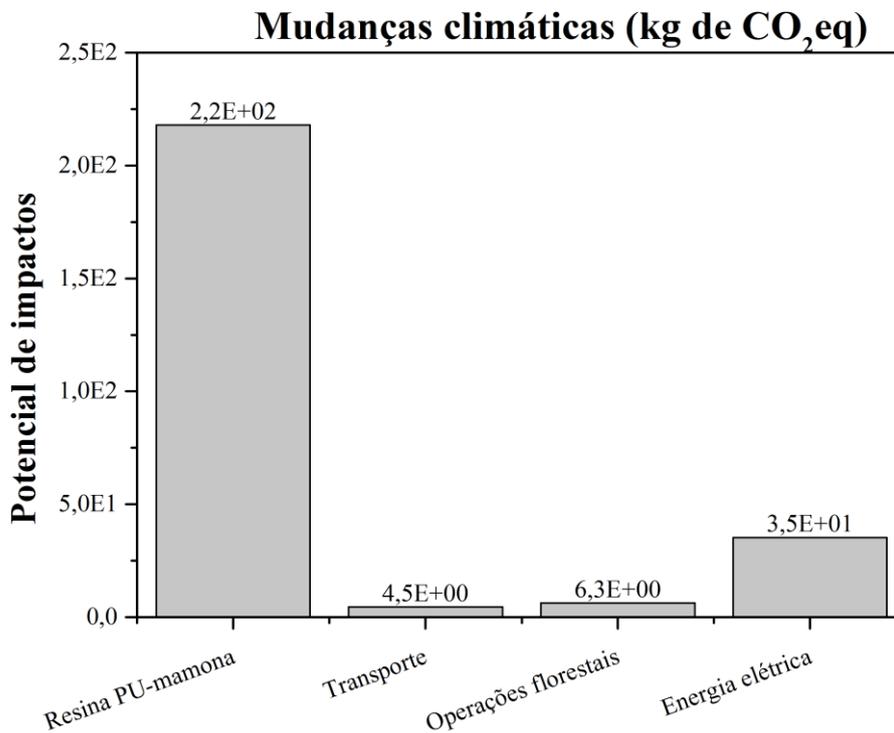
Na Figura 27 estão ilustrados os resultados dos impactos ambientais potenciais estratificados para a categoria de impacto MC e para o subsistema OPP<sub>i</sub>.

**Figura 27** - Mudanças climáticas- subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP<sub>i</sub>)

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 27, a produção de resina MDI foi responsável por aproximadamente 39% das emissões totais de CO<sub>2</sub> eq para a categoria MC. A resina MDI é à base de petróleo e a utilização desta matéria-prima para sua fabricação contribui com aproximadamente 78% das emissões de CO<sub>2</sub> eq derivadas deste processo. A produção de eletricidade foi responsável por quase 20% do total de emissões de CO<sub>2</sub> eq, principalmente devido ao uso de fontes não renováveis, como carvão e petróleo no mix energético brasileiro.

Na Figura 28 estão ilustrados os resultados dos impactos ambientais potenciais estratificados para a categoria de impacto MC para o subsistema OPP<sub>1</sub>.

**Figura 28** - Mudanças climáticas- subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP<sub>i</sub>)

Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 28, percebe-se que a fabricação da resina PU-mamona foi o maior contribuinte para a categoria MC, responsável por aproximadamente 70% das emissões de CO<sub>2</sub> eq. Como mencionado, a resina PU-mamona é bicomponente, composta pelo polioli e pré-polímero (isocianato). O isocianato mais utilizado comercialmente é o MDI, sendo assim, a utilização do petróleo como matéria-prima para sua fabricação foi o principal responsável pelos altos potenciais de impactos nesta categoria, com contribuição aproximada de 70% das emissões de CO<sub>2</sub> eq.

Assim como no subsistema OPP<sub>i</sub>, a energia elétrica foi o segundo maior colaborador com as emissões, contribuindo com aproximadamente 14%. Também se deve ao uso de fontes não renováveis, como carvão e petróleo, no mix energético brasileiro.

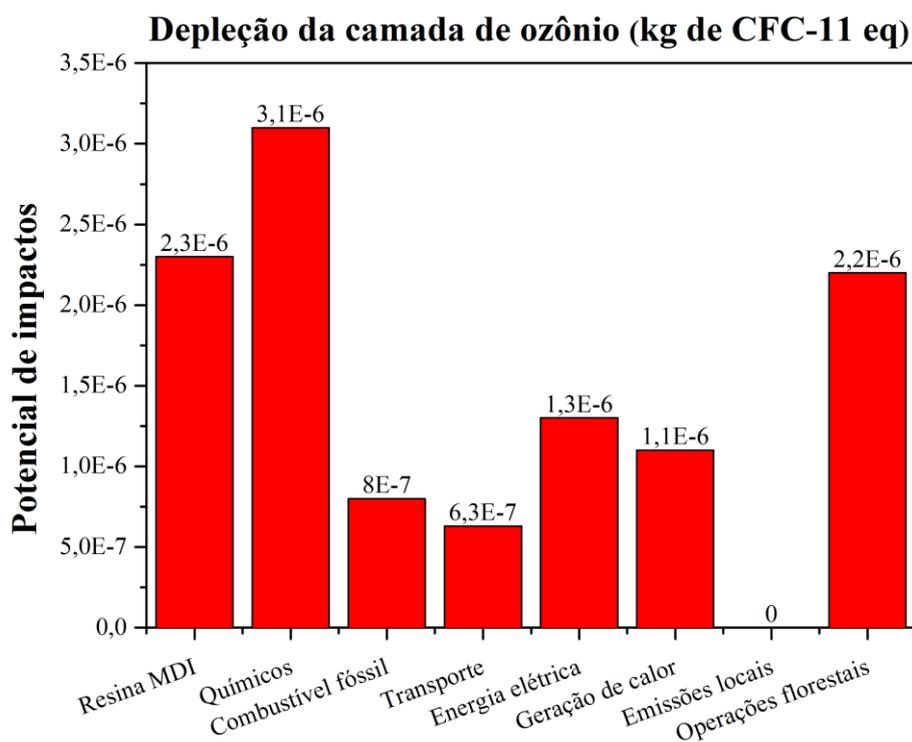
Confrontando os dois subsistemas, observa-se que o uso da resina MDI, para o subsistema OPP<sub>i</sub>, resultou em 30% menos emissões em relação à OPP<sub>i</sub>. O uso da resina MDI contribuiu com 60 kg de CO<sub>2</sub> eq, enquanto que o uso da resina PU-mamona contribuiu com 220 kg de CO<sub>2</sub> eq. Isso se deve principalmente a alta porcentagem de resina aplicada na fabricação do painel em laboratório. No que concerne ao uso da energia elétrica, em ambos os subsistemas a contribuição com os encargos ambientais para MC foram aproximadamente

equivalentes, 35 e 32 kg de CO<sub>2</sub> para as escalas laboratorial e industrial, respectivamente. Ainda, cabe ressaltar que durante o processo de fabricação do painel em laboratório não há o consumo de energia térmica como acontece na indústria. Por fim, para as operações florestais, observa-se na Figura 28 que o uso da madeira de desbaste proporcionou redução de 55% em relação ao subsistema OF<sub>i</sub> nos encargos ambientais para MC.

#### 4.2.3.2.2 Depleção da camada de ozônio (DO)

Na Figura 29 estão ilustrados os resultados dos impactos potenciais ambientais estratificados para a categoria de impacto DO para o subsistema OPP<sub>i</sub>.

**Figura 29** – Depleção da camada de ozônio- subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP<sub>i</sub>)



Fonte: Próprio autor.

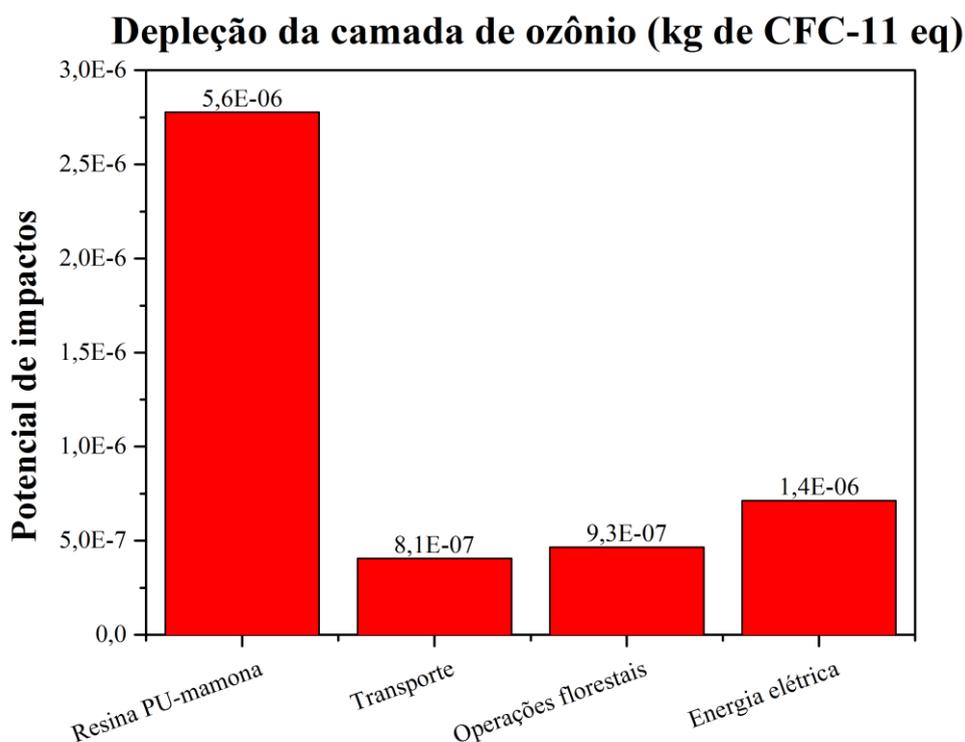
De acordo com a Figura 29, para a categoria de impacto DO, a produção de substâncias químicas (parafina e inseticida piretróide) foi o maior contribuinte ( $\approx 36\%$ ) para esta categoria de impacto, principalmente devido à alta quantidade de CH<sub>4</sub> (metano) emitida na atmosfera durante a produção da CCl<sub>4</sub> (tetracloroeto de carbono), uma das principais matérias-primas utilizadas na produção do inseticida piretróide.

A segunda maior contribuição foi proveniente das Operações florestais, responsáveis por 20% do total de substâncias contribuintes, principalmente devido à alta quantidade de diesel requerida pelo equipamento *harvester*, utilizado na etapa da colheita florestal.

Por fim, a produção de resina MDI segue como terceiro maior contribuinte (17% do total de CFC-11 eq emitido). A utilização de petróleo bruto como matéria-prima para a produção de resina MDI é grande contribuinte para esta categoria de impacto.

Na Figura 30 estão ilustrados os resultados dos impactos potenciais ambientais estratificados para a categoria de impacto DO para o subsistema  $OPP_1$ .

**Figura 30** – Depleção da camada de ozônio- subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial ( $OPP_1$ )



Fonte: Próprio autor.

Observa-se, na Figura 30, que a produção da resina PU-mamona seguida pela Energia elétrica foram os maiores contribuintes, aproximadamente 43 e 16%, respectivamente, pelos potenciais de impactos na categoria DO. Tais resultados se justificam pela utilização do petróleo bruto como matéria-prima na produção do isocianato e uso de fontes não renováveis, como carvão e petróleo, no mix energético brasileiro.

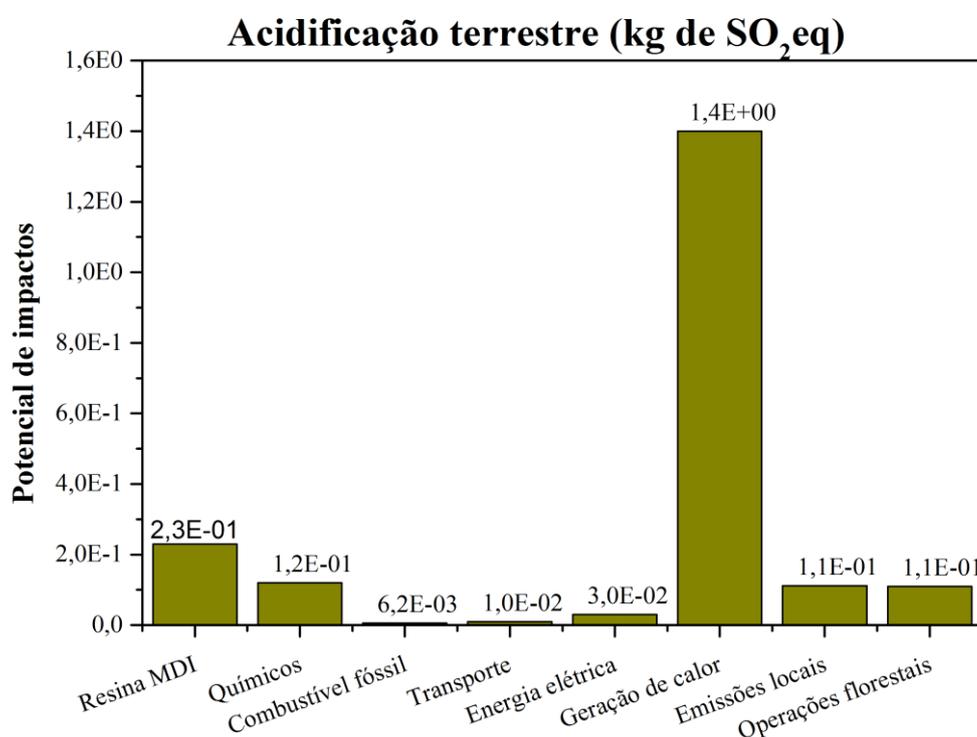
Comparando os dois subsistemas de produção de OSB, observa-se que a contribuição da

resina utilizada em escala laboratorial, PU-mamona, foi aproximadamente 59% superior em relação a resina utilizada na indústria, MDI, e deve-se principalmente a grande percentagem utilizada em laboratório. Todavia, no subsistema OPP<sub>i</sub>, os químicos tiveram alta contribuição para os encargos ambientais para a categoria de impacto DO. Neste caso, cabe ressaltar que o uso da resina PU-mamona dispensa o uso de químicos, uma vez que, em estudos anteriores (FERRO et al., 2016), tal resina mostrou-se resistente ao ataque de organismos xilófagos. Ainda, a contribuição com o potencial de impacto relacionada ao consumo de energia elétrica foi aproximadamente equivalente em ambos os subsistemas, enquanto que a atividade de Operação florestal em OPP<sub>i</sub> foi aproximadamente 59% inferior para o OPP<sub>i</sub>.

#### 4.2.3.2.3 Acidificação terrestre (AT)

Na Figura 31 estão ilustrados os resultados dos impactos ambientais potenciais estratificados para a categoria de impacto AT para o subsistema OPP<sub>i</sub>.

**Figura 31** - Acidificação terrestre - subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP<sub>i</sub>)



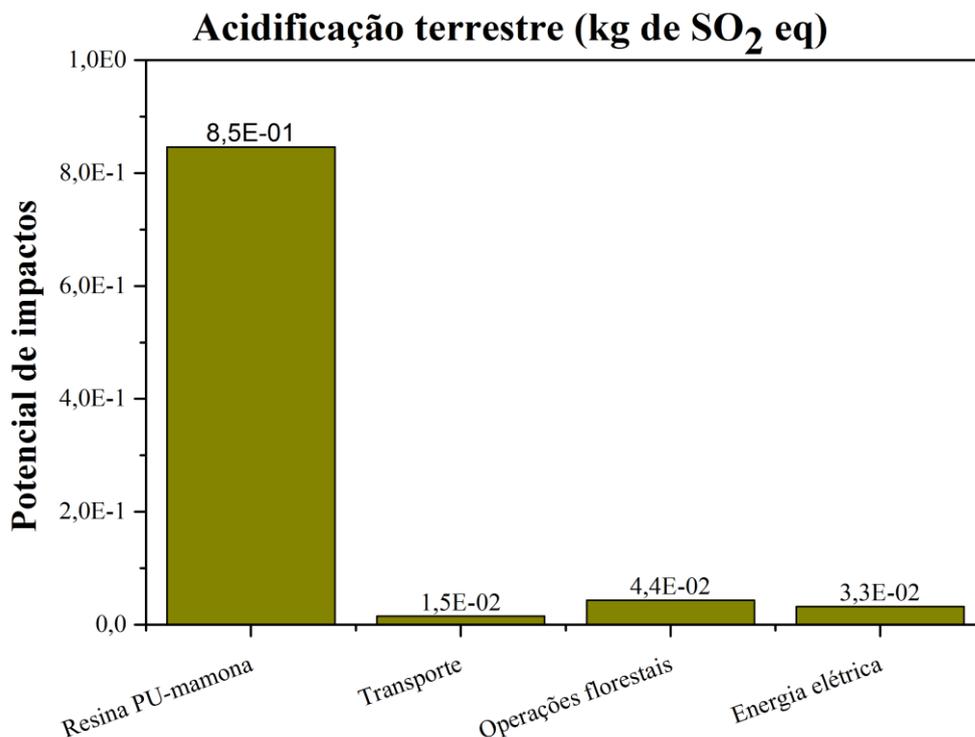
Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado na Figura 31, para a categoria de impacto AT, as emissões

relacionadas à atividade de Geração de calor (queima de biomassa), para secagem das partículas de madeira e aquecimento do óleo da prensa, são responsáveis por 74% do total de  $\text{SO}_2$  eq emitido para a atmosfera. Gases como  $\text{NH}_3$  e  $\text{SO}_2$ , provenientes da combustão da casca e biomassa residuais lenhosas (como serragem e resíduos de corte do painel) em uma unidade de geração de calor, são substâncias de notável contribuição para a categoria de impacto AT. A produção da resina MDI foi responsável por aproximadamente 12% das emissões acidificantes totais, principalmente devido às emissões de  $\text{SO}_2$  durante o processo de fabricação da resina.

A seguir, na Figura 32, estão apresentados os resultados dos impactos ambientais potenciais estratificados para a categoria de impacto AT e para o subsistema  $\text{OPP}_1$ .

**Figura 32** - Acidificação terrestre - subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial ( $\text{OPP}_1$ )



Fonte: Próprio autor.

Pela Figura 32 observa-se que a resina PU-mamona foi a grande colaboradora (86%) com os impactos na categoria AT. Tal contribuição é devida às emissões de  $\text{SO}_2$  durante o processo de fabricação do isocianato, componente da resina.

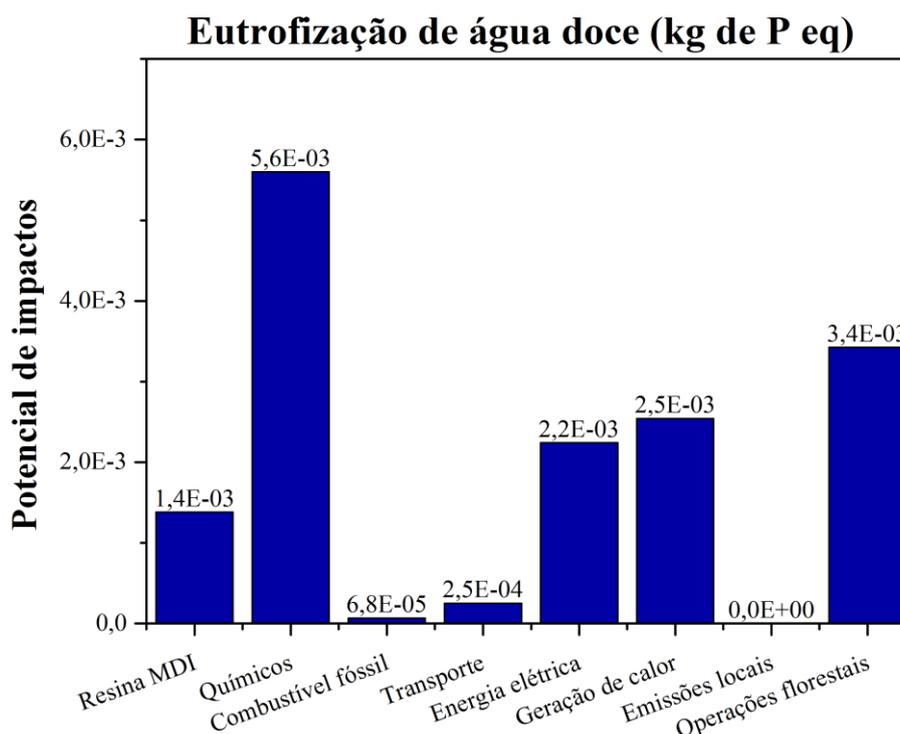
Ao se comparar os dois subsistemas, observa-se para a categoria AT que o uso da resina PU-mamona contribuiu com 8,5E-1 kg de  $\text{SO}_2$  eq, enquanto que o uso da resina MDI contribuiu com 2,3E-1 das cargas de  $\text{SO}_2$  totais, ou seja, com índice de superioridade de aproximadamente

73% do primeiro subsistema em relação ao segundo. Com relação ao uso de energia elétrica, ocorreu contribuição de  $3,3E-2$  e  $3,0E-2$  de  $SO_2$  eq para as escalas laboratorial e industrial, respectivamente. Tal diferença pode estar associada ao uso de energia térmica proveniente da queima de biomassa, a qual ajuda no aquecimento da prensa e faz com que, conseqüentemente, ocorra menor consumo de energia elétrica. Ainda, o uso da madeira de desbaste em  $OPP_1$  proporcionou redução de impacto de aproximadamente 60% em relação a  $OPP_1$  em AT.

#### 4.2.3.2.4 Eutrofização de água doce (EA)

Na Figura 33 estão ilustrados os resultados dos impactos ambientais potenciais estratificados para a categoria de impacto EA e para o subsistema  $OPP_1$ .

**Figura 33-** Eutrofização de água doce – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial ( $OPP_1$ )



Fonte: Próprio autor.

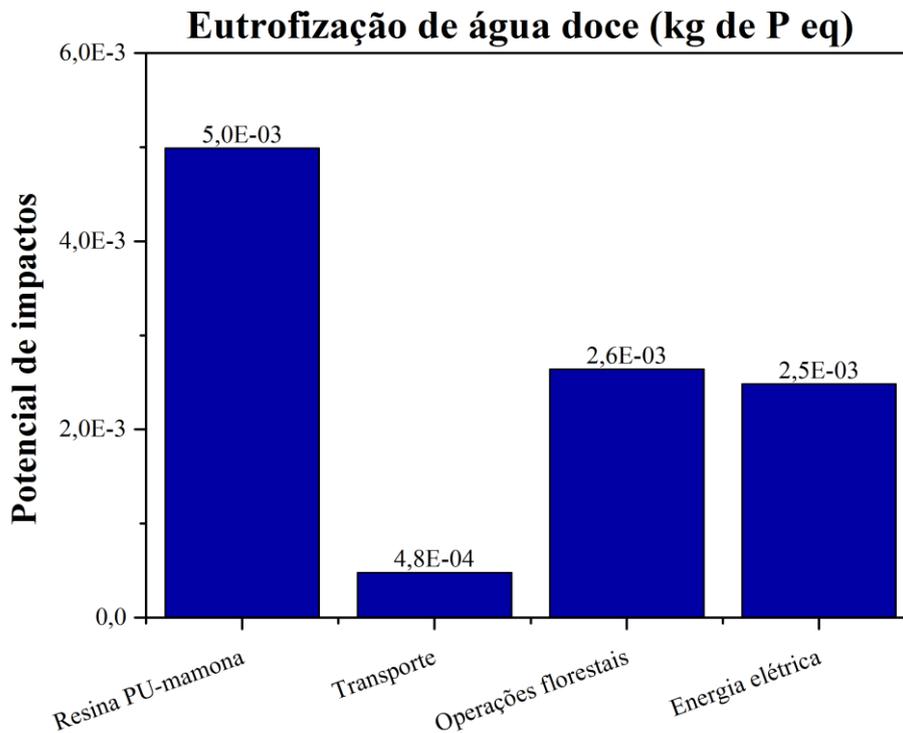
A partir da Figura 33, para a categoria de impacto EA, a produção de produtos químicos como a parafina e o inseticida piretróide foi responsável pela maioria dos encargos que contribuem para esta categoria ( $\approx 33\%$  do total P eq emitido), sendo o inseticida piretróide o principal responsável (90% destas emissões). No processo de produção de inseticidas, os principais requisitos

de energia vêm da etapa de geração de calor no local, por intermédio do uso de óleo combustível pesado (BPF), o que contribui para os impactos nessa categoria.

As atividades de Operações florestais foram as segundas maiores cooperadoras para esta categoria de impacto ( $\approx 29\%$ ). As substâncias que contribuem para o EA estão relacionadas, principalmente, com a produção de superfosfato. Tal fertilizante é utilizado nos estágios de Preparação do solo e de Manejo florestal no subsistema de Operações florestais, para a produção da madeira de *Pinus*.

Na Figura 34 constam os resultados dos impactos ambientais para a categoria EA, subsistema OPP<sub>1</sub>.

**Figura 34** - Eutrofização de água doce - subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP<sub>1</sub>)



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 34, as maiores emissões de P<sub>eq</sub> foram provenientes da resina PU-mamona, principalmente da produção do componente isocianato (responsável por 47% do total de P eq emitido). Partes dos resíduos gerados na fabricação desse componente são incinerados, o que contribui com tais emissões. A produção de energia elétrica foi responsável por 24% das emissões contribuintes para a categoria EA, sobretudo devido à origem renovável

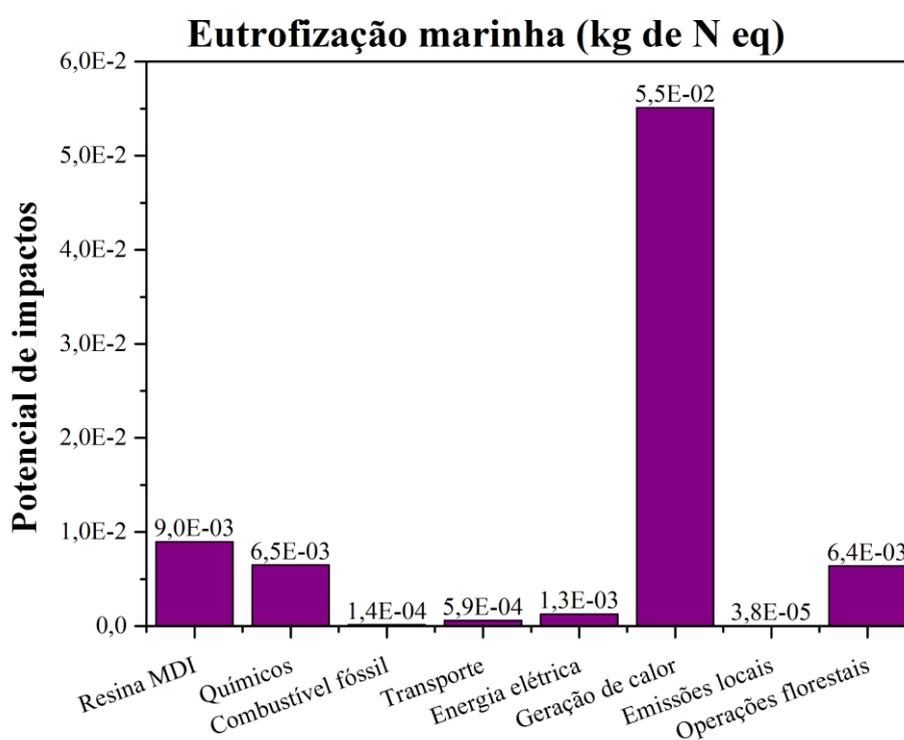
de parte do mix energético brasileiro.

Confrontando os subsistemas, quando comparado com a resina MDI, a resina PU-mamona contribuiu 72% a mais com a quantidade de P eq para a categoria EA. Entretanto, como a aplicação da resina PU-mamona dispensa o uso de químicos, pode-se dizer que o uso de tal resina proporciona redução de aproximadamente 28% na emissão de P eq. A energia elétrica foi responsável pela emissão de 2,5 E-3 e 2,2E-3 kg de P eq em OPP<sub>1</sub> e OPP<sub>i</sub>, respectivamente. Tal diferença pode ser atribuída ao uso de energia térmica na produção em escala industrial. Por fim, o uso da madeira proveniente de desbaste resultou em diminuição dos encargos ambientais de 23% de OPP<sub>1</sub> em relação à OPP<sub>i</sub>.

#### 4.2.3.2.5 Eutrofização marinha (EM)

Na Figura 35 estão ilustrados os resultados dos impactos ambientais potenciais estratificados para a categoria de impacto EM para o subsistema OPP<sub>i</sub>.

**Figura 35** - Eutrofização marinha – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP<sub>i</sub>)



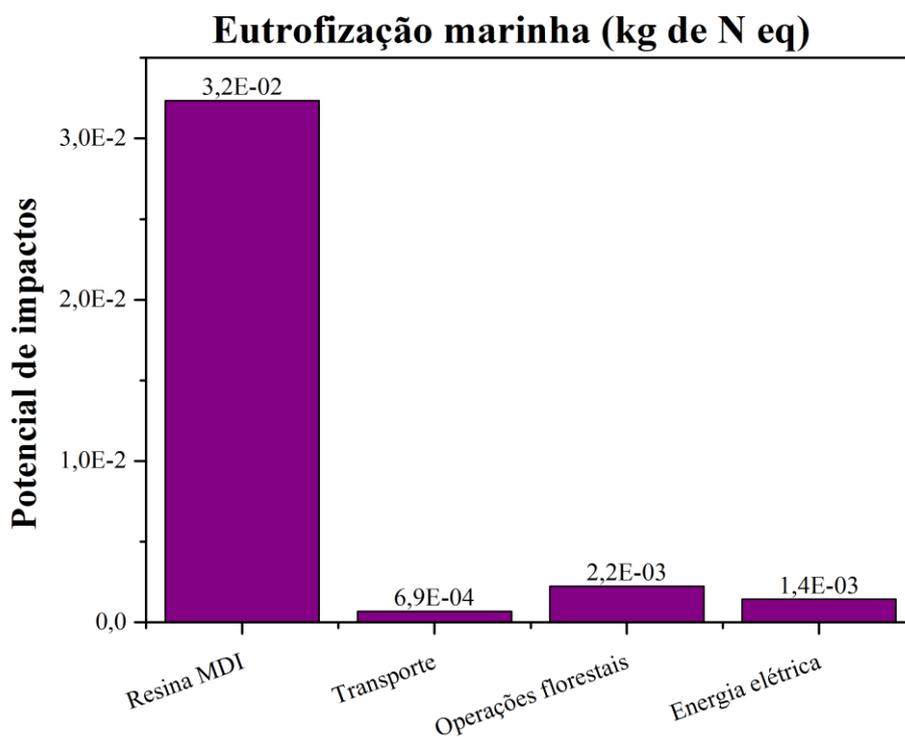
Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 35, para a categoria de impacto EM, cerca de 70% dos impactos contribuintes estão relacionados com as emissões produzidas na combustão de biomassa, para

geração de calor, devido à emissão do gás NO para a atmosfera. A produção de resina MDI é o segundo maior contribuinte para esta categoria ( $\approx 11\%$  do total de N eq emitido), principalmente devido à sua origem fóssil.

Os resultados referentes aos impactos ambientais potenciais de EM para o subsistema  $OPP_1$  estão apresentados a seguir, na Figura 36.

**Figura 36** - Eutrofização marinha – subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial ( $OPP_1$ )



Fonte: Próprio autor.

Pela Figura 36, a resina PU-mamona e as atividades de transporte se destacam com maiores participações nos impactos para a categoria EM, responsáveis por aproximadamente 82 e 8%, respectivamente. Os impactos são principalmente devidos à origem fóssil dos componentes isocianato da resina PU-mamona e do diesel utilizado no caminhão, para o transporte das toras de madeira da área florestal até a laboratório onde foram produzidos os OSB.

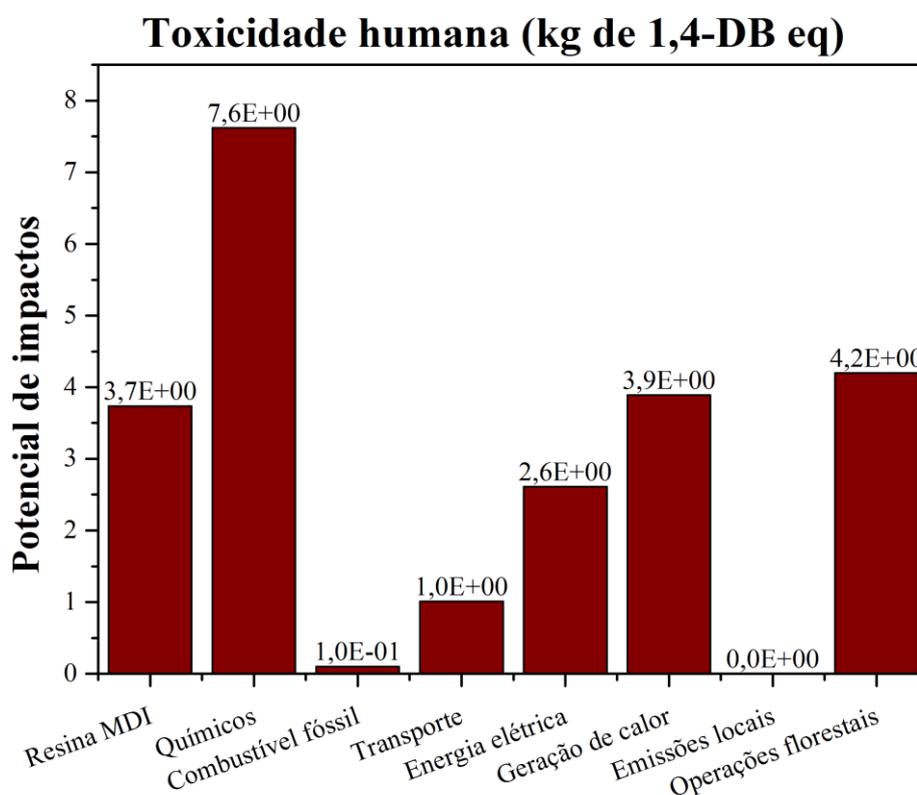
Comparando-se os dois subsistemas de produção de OSB, observa-se que a contribuição da resina utilizada em escala laboratorial, PU-mamona, foi aproximadamente 72% superior em relação a resina utilizada na indústria, MDI, para a categoria EM. No que diz respeito, ao consumo de energia elétrica, ocorreu contribuição com as cargas ambientais aproximadamente equivalente em ambos os subsistemas analisados. Já para as atividades operação florestais as cargas

ambientais emitidas derivadas desse processo foram superiores em 65% para  $OPP_i$  em relação ao subsistema  $OPP_i$ .

#### 4.2.3.2.6 Toxicidade humana (TH)

Na Figura 37 estão ilustrados os resultados dos impactos estratificados para a categoria de impacto TH para o subsistema  $OPP_i$ .

**Figura 37** - Toxicidade Humana – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial ( $OPP_i$ )



Fonte: Próprio autor.

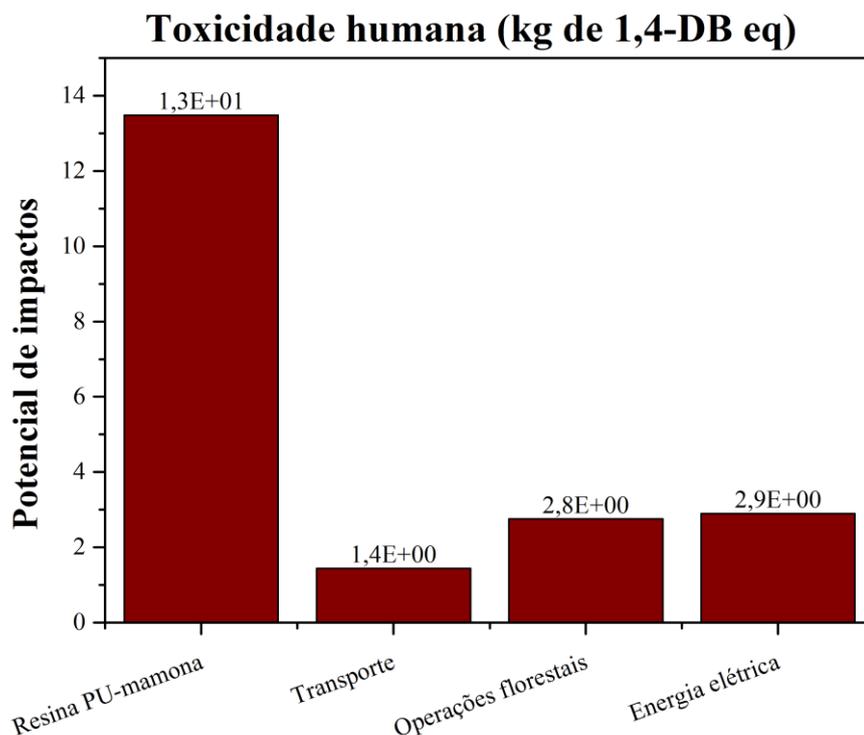
A partir da Figura 37, pode-se observar que a produção de produtos químicos, ou seja, parafina e inseticida piretróide, foi responsável por 33% das emissões equivalentes de 1,4-diclorobenzeno (1,4-DCB eq) emitidas em todo o ciclo de vida do sistema em estudo. De fato, a produção de inseticida piretróide contribuiu com 86%, sendo considerado o “*hotspot*” ambiental, devido às emissões de Mn e As derivadas de suas atividades produtivas.

As Operações florestais foram responsáveis por 18% das contribuições totais da categoria TH. Tais impactos são, sobretudo, provenientes da etapa de colheita florestal ( $\approx 31\%$ ),

devidos ao processo de colheita das árvores.

Na Figura 38 estão ilustrados os resultados dos impactos estratificados para a categoria de impacto TH para o subsistema OPP<sub>i</sub>.

**Figura 38** - Toxicidade Humana – subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP<sub>i</sub>)



Fonte: Próprio autor.

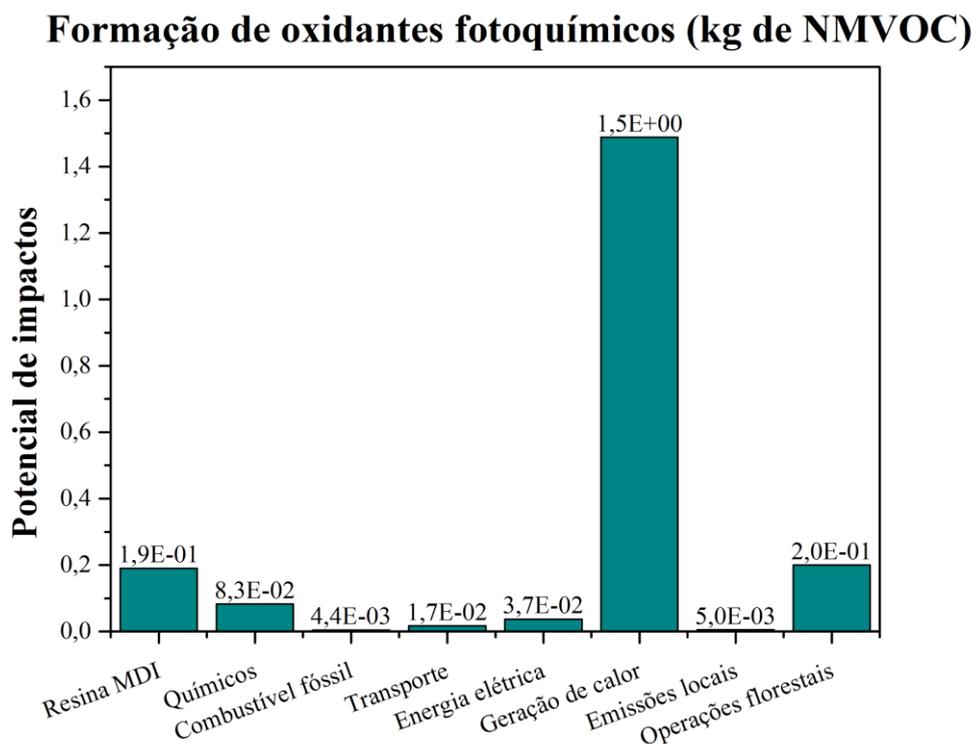
Nota-se, na Figura 38, que a produção de resina PU-mamona foi responsável por 46% das contribuições totais da categoria de impacto TH, principalmente devido à emissão de CH<sub>4</sub> (metano) derivado da fabricação do componente isocianato. O consumo de energia elétrica segue como segundo maior contribuinte (com  $\approx 14,4\%$ ) dos impactos em TH, devido ao uso de fontes não renováveis, como carvão e petróleo, no mix energético brasileiro.

Ao se comparar os subsistemas OPP<sub>i</sub> e OPP<sub>1</sub>, observa-se que as contribuições derivadas do uso da resina PU-mamona para TH foram superiores em 71% em relação ao uso da resina MDI. Os encargos ambientais provenientes do uso da energia elétrica e as atividades florestais em OPP<sub>i</sub> foram inferiores em 10 e superiores em 33%, respectivamente, em relação ao subsistema OPP<sub>1</sub>.

#### 4.2.3.2.7 Formação de oxidantes fotoquímico (FOF)

Na Figura 39 estão ilustrados os resultados dos impactos estratificados para a categoria de impacto FOF para o subsistema  $OPP_i$ .

**Figura 39** – Formação de oxidantes fotoquímicos – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial ( $OPP_i$ )

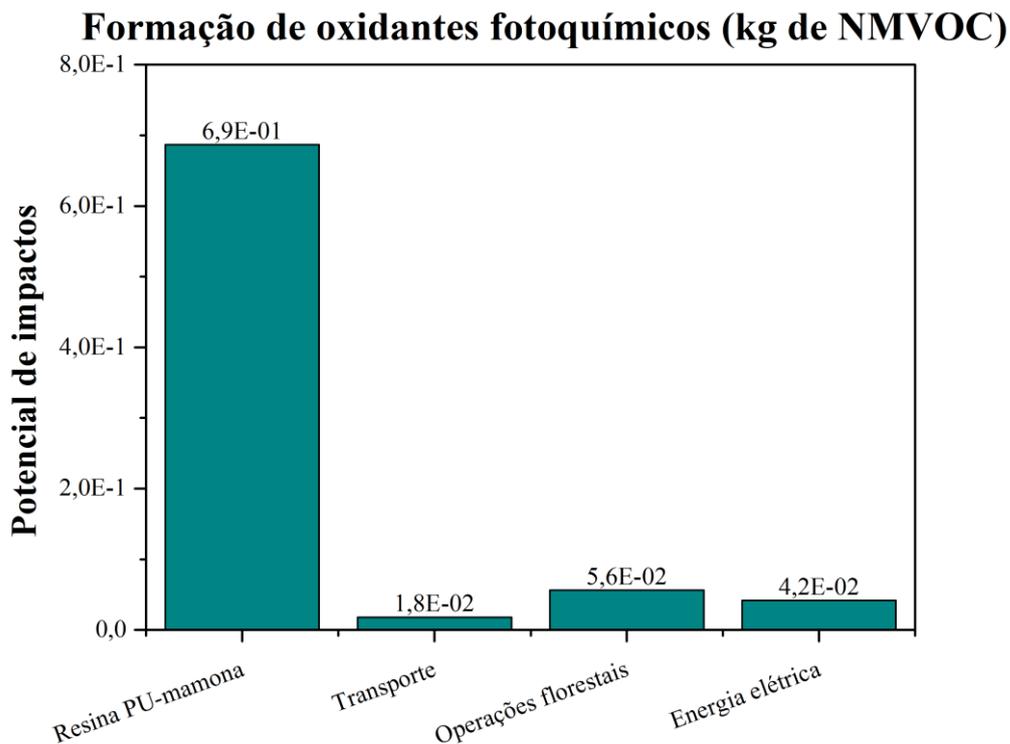


Fonte: Próprio autor.

Observa-se, na Figura 39, que para a categoria de impacto FOF, as emissões provenientes da atividade de geração de calor foram responsáveis por 75% dos encargos totais que contribuem para esta categoria. Gases como  $NO_x$ ,  $CO$  e  $CH_4$  provenientes da combustão de casca e biomassa residual lenhosa são emitidos na atmosfera, contribuindo para o potencial de impacto. A produção de resina MDI envolve 10% de emissões equivalentes, principalmente por causa da emissão de  $NO_x$  derivado de sua origem à base de petróleo.

A seguir na Figura 40 estão apresentados os resultados dos impactos ambientais potenciais para o subsistema  $OPP_i$ .

**Figura 40** - Formação de oxidantes fotoquímicos – subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP<sub>1</sub>)



Fonte: Próprio autor.

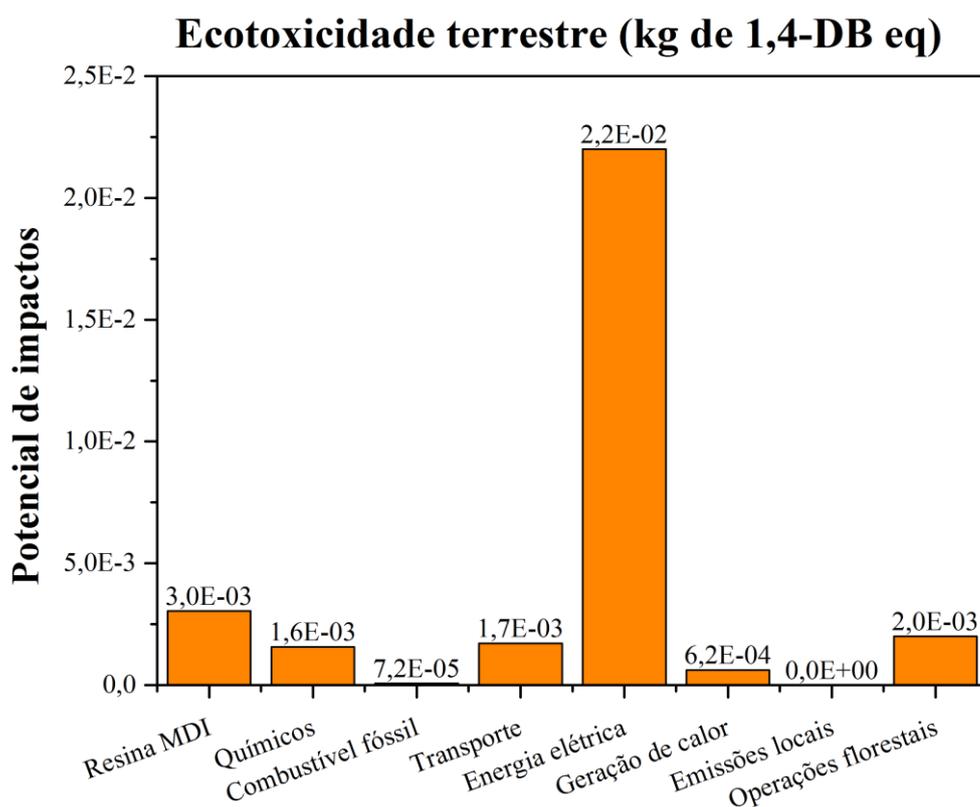
Pela Figura 40, mais de 80% dos impactos potenciais para a categoria FOF foram provenientes da produção da resina PU-mamona, sobretudo o componente isocianato. Os impactos são principalmente resultantes da emissão de  $\text{NO}_x$ , devido à sua origem à base de petróleo.

Ao se comparar os dois subsistemas, observa-se para a categoria FOF que o uso da resina PU-mamona contribuiu com 6,9E-1 kg de  $\text{SO}_2$  eq, enquanto que o uso da resina MDI contribuiu com 1,9E-1 kg de NMVOC, ou seja, com índice de superioridade de aproximadamente 72% do primeiro subsistema em relação ao segundo. Com relação ao uso de energia elétrica, o OPP<sub>1</sub> e OPP<sub>2</sub>, emitiram 4,2E-2 e 3,7E-2 kg NMVOC, respectivamente. Tal diferença pode estar associada ao uso de energia térmica proveniente da queima de biomassa, a qual ajuda no aquecimento da prensa e faz com que, conseqüentemente, ocorra menor consumo de energia elétrica. Contudo, é importante destacar que o uso de energia térmica na escala industrial foi responsável pelas maiores emissões para FOF. Ainda, o uso da madeira de desbaste em OPP<sub>1</sub> proporcionou redução de 72% das emissões contribuintes para a categoria FOF.

#### 4.2.3.2.8 Ecotoxicidade terrestre (ET)

Na Figura 41 estão ilustrados os resultados dos impactos estratificados para a categoria de impacto ET para o subsistema OPP<sub>i</sub>.

**Figura 41** - Ecotoxicidade terrestre – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP<sub>i</sub>)

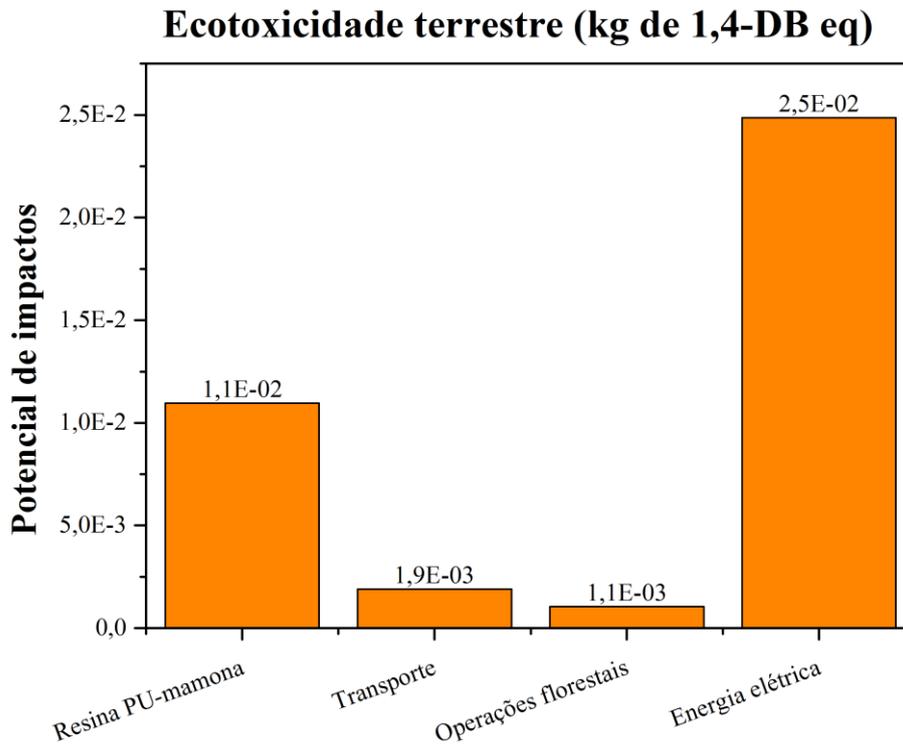


Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar na Figura 41 que, para a categoria de impacto ET, a produção de eletricidade representa mais de 71% das contribuições totais para o potencial de impacto. Essa alta contribuição está relacionada com o mix energético brasileiro, que depende em parte de fontes renováveis, principalmente bagaço de cana-de-açúcar. As atividades agrícolas que envolvem a produção da cana-de-açúcar, especificamente as relacionadas com a preparação do solo, são as principais responsáveis pela contribuição para o potencial de impacto em ET. A produção da resina MDI é a segunda responsável pela emissão de 1,4-DB eq ( $\approx 10\%$ ), devido às emissões diretas de cloridrina em seu processo de fabricação.

Os resultados referentes aos impactos para o subsistema OPP<sub>i</sub> estão apresentados a seguir, na Figura 42.

**Figura 42** - Ecotoxicidade terrestre – subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP<sub>i</sub>)



Fonte: Próprio autor.

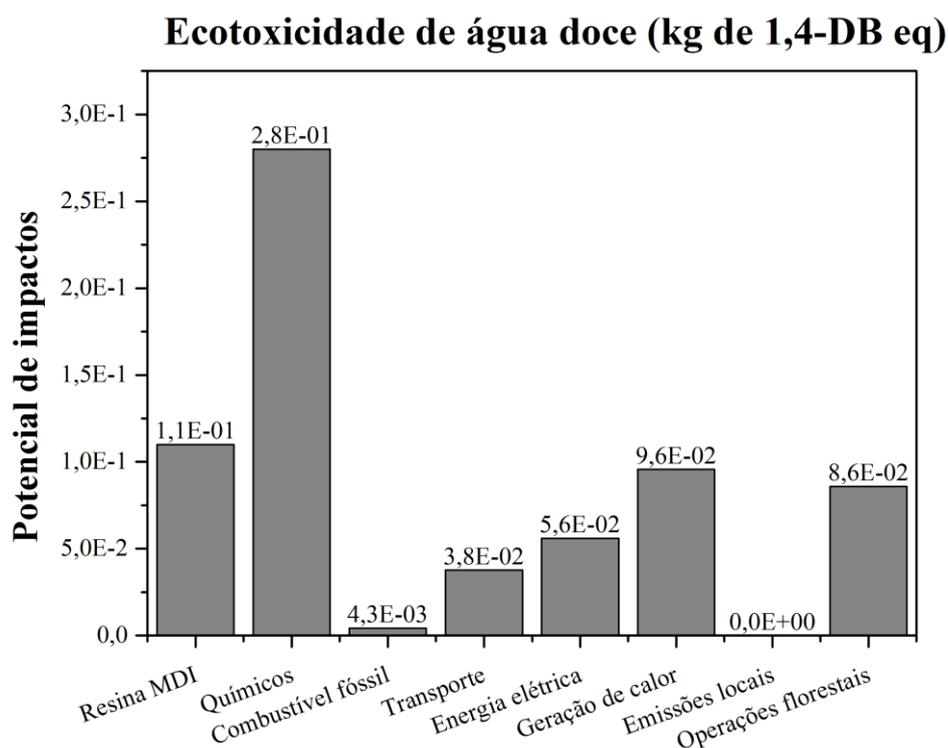
Nota-se, na Figura 42, que a produção de Energia elétrica foi o principal causador dos impactos na categoria ET (cerca de 44%), como justificado para o subsistema OPP<sub>i</sub>, tal contribuição deve-se ao mix energético brasileiro. Na segunda colocação está o consumo de energia elétrica pelas máquinas do laboratório, uma vez que está relacionada com o mix energético brasileiro, que depende em parte de fontes renováveis, principalmente bagaço de cana-de-açúcar.

Ao se comparar os subsistemas OPP<sub>i</sub> e OPP<sub>1</sub>, observa-se que em ambos os casos os maiores contribuintes para a categoria ET foram o uso da resina e energia elétrica. Ainda, com relação a resina, as emissões provenientes do uso da PU-mamona foram superiores em 72% ao uso da resina MDI, principalmente ao alto teor aplicado em laboratório. Os encargos ambientais provenientes do uso da energia elétrica e as atividades florestais em OPP<sub>i</sub> foram inferiores em 12 e superiores em 45%, respectivamente, em relação ao subsistema OPP<sub>1</sub>.

#### 4.2.3.2.9 Ecotoxicidade de água doce (ETa)

Na Figura 43 estão ilustrados os resultados dos impactos estratificados para a categoria de impacto ETa e para o subsistema OPP<sub>i</sub>.

**Figura 43** - Ecotoxicidade de água doce – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP<sub>i</sub>)

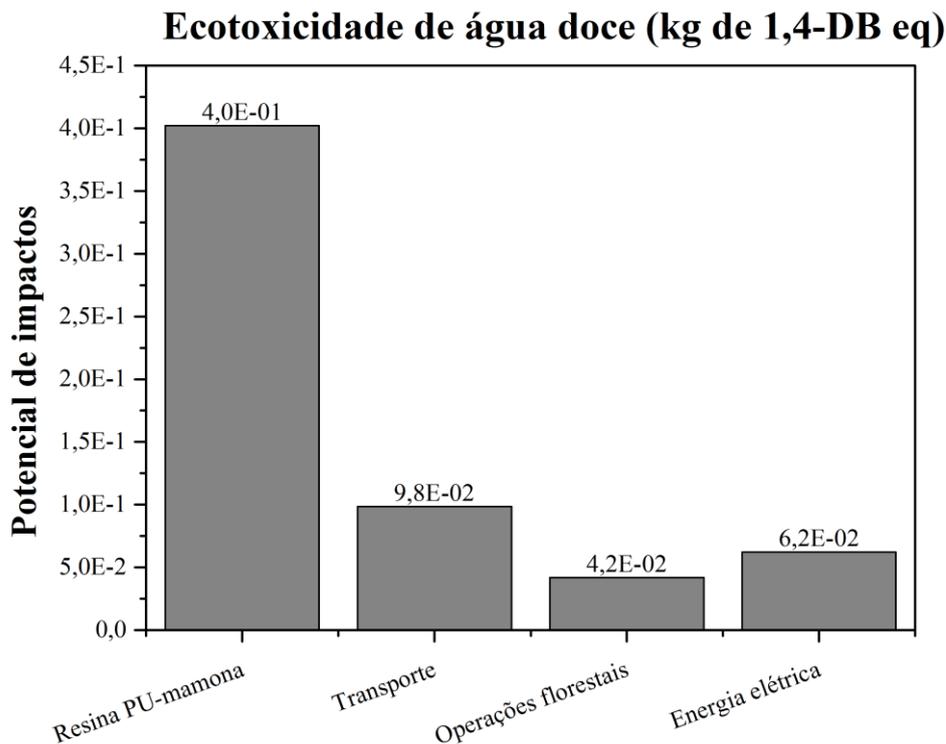


Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 43, para a categoria de impacto ETa, aproximadamente 42% do total de 1,4-DCB eq de todo o ciclo de vida da cadeia produtiva do OSB está associado à resina MDI, uma vez que metais como Cu e Mg, derivados do processo de fabricação da resina, são emitidos na água. A produção dos produtos químicos envolveu 38% das contribuições do potencial de impacto sendo o inseticida piretróide, o principal responsável (30% do total de substâncias contribuintes). Substâncias como Cu e Mg, derivado do seu processo de fabricação, são emitidas em água.

A seguir na Figura 44 estão apresentados os resultados estratificados dos impactos associados a categoria ETa para o subsistema OPP<sub>i</sub>.

**Figura 44** - Ecotoxicidade de água doce – subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP<sub>i</sub>)



Fonte: Próprio autor.

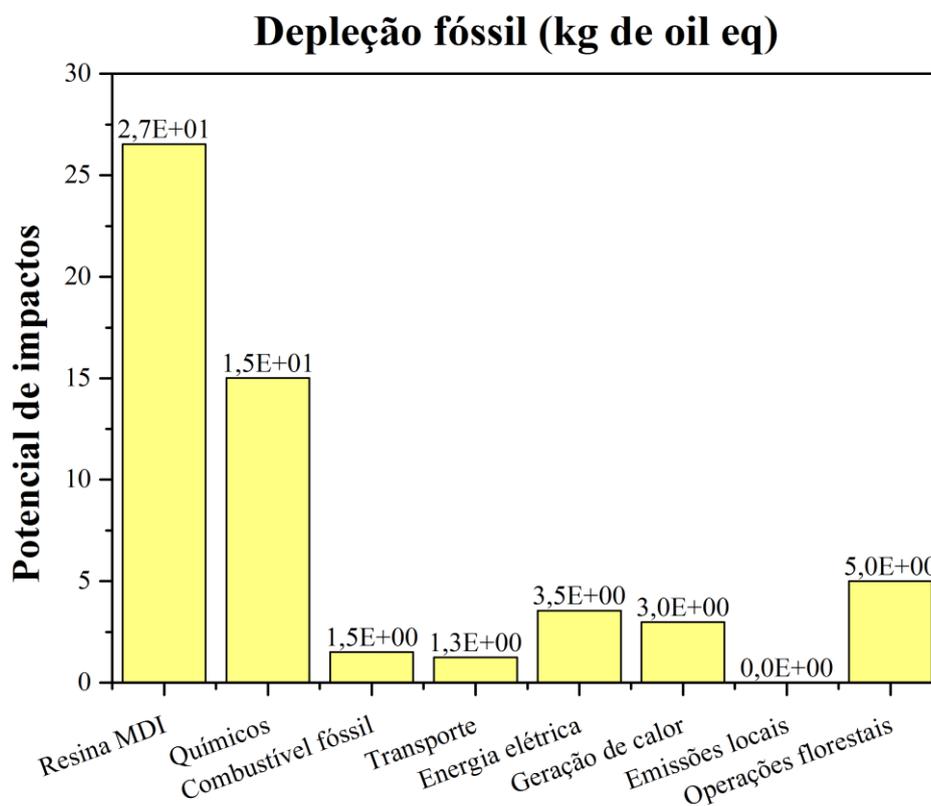
Segundo a Figura 44, a resina PU-mamona foi responsável por 52% dos impactos ambientais associados à categoria ETa. Tais impactos provêm da fabricação do componente isocianato, devido à emissão na água de metais como Cu e Mg, derivados de seu processo de fabricação.

Comparando-se os subsistemas, observa-se para a categoria ETa que o uso da resina PU-mamona contribuiu com 4,0E-1 kg de 1,4-DB eq, enquanto que o uso da resina MDI contribuiu com 1,1E-1 kg de 1,4-DB eq, ou seja, com índice de superioridade de aproximadamente 72% do primeiro subsistema em relação ao segundo. Com relação ao uso de energia elétrica, o OPP<sub>1</sub> emitiu 9,6% mais cargas que o OPP<sub>i</sub>. Ainda, o uso da madeira de desbaste em OPP<sub>1</sub> proporcionou redução de 49% em relação à OPP<sub>i</sub> nas emissões contribuintes para a categoria ETa.

#### 4.2.3.2.10 Depleção fóssil (DF)

Na Figura 45 estão ilustrados os resultados dos impactos estratificados para a categoria de impacto DF, subsistema OPP<sub>i</sub>.

**Figura 45** - Depleção fóssil – subsistema de operação de produção do painel em escala industrial (OPP<sub>1</sub>)

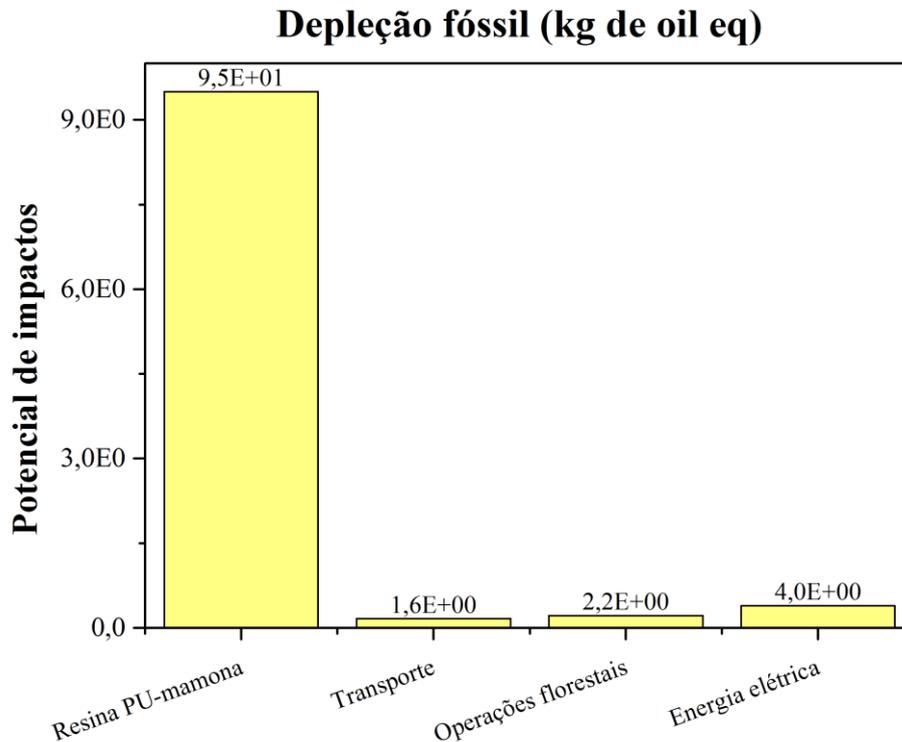


Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 45, para a categoria de impacto DF, as contribuições da produção da resina MDI são cerca de 48% do total de insumos para DF, seguido pela fabricação dos demais químicos (parafina e inseticida piretroide) - 27%, sendo a parafina a principal responsável (7% do total). Todos estes produtos químicos derivam de petróleo, portanto, extração de petróleo bruto é o contribuinte responsável para DF.

Os resultados referentes aos impactos para o subsistema OPP<sub>1</sub> estão apresentados a seguir, na Figura 46.

**Figura 46** - Depleção fóssil – subsistema de operação de produção do painel em escala laboratorial (OPP<sub>1</sub>)



Fonte: Próprio autor.

Pela Figura 46, observa-se que a produção do componente isocianato da resina PU-mamona foi responsável por 92% das emissões de óleo eq, seguido do consumo de Energia elétrica, no qual mix energético brasileiro é proveniente de fontes não renováveis como petróleo e gás natural o que contribui com os impactos nesta categoria.

Comparando-se os dois subsistemas de produção de OSB, para a categoria DF, observa-se que a contribuições provenientes da utilização da resina PU-mamona, foi aproximadamente 71% superior em relação a resina MDI, para a categoria EM. No que diz respeito ao consumo de energia elétrica, os impactos resultantes do subsistema OPP<sub>1</sub> são 12,5% em relação ao OPP<sub>i</sub>. Já para as atividades operação florestais as cargas ambientais emitidas derivadas desse processo foram superiores em 56% para OPP<sub>i</sub> em relação ao subsistema OPP<sub>1</sub>.

#### 4.2.4 Interpretação

Neste estudo, o processo de produção brasileira de OSB "*home*" foi analisado em

detalhes com o objetivo de identificar os encargos ambientais e os “hotspots” para este painel de madeira, amplamente utilizado no setor da construção civil. Paralelamente, também foram avaliadas as cargas ambientais de um OSB, com propriedades físico-mecânicas semelhantes, produzidos em laboratório.

Na Tabela 16 foram apresentados os principais “hotspots” levantados neste estudo para produção do OSB em cada subsistema analisado.

**Tabela 16** - Hotspots da produção de OSB nas escalas laboratorial e industrial

Categoria de impacto	Hotspots	
	OPP <sub>i</sub>	OPP <sub>1</sub>
<b>MC</b>	Resina MDI/Geração de calor	Resina/Energia elétrica
<b>DO</b>	Químicos/Resina MDI	Resina PU-mamona/Transporte
<b>AT</b>	Geração de calor/Resina MDI	Resina PU-mamona/Transporte
<b>EA</b>	Químicos/Operações florestais	Resina PU-mamona/Energia elétrica
<b>EM</b>	Geração de calor/Resina MDI	Resina PU-mamona/Transporte
<b>TH</b>	Químicos/Operações florestais	Resina PU-mamona/Transporte
<b>FOF</b>	Geração de calor/Resina MDI	Resina PU-mamona/Transporte
<b>ET</b>	Energia elétrica/Resina MDI	Energia elétrica/Pu-mamona
<b>ETa</b>	Químicos/Resina MDI	Resina PU-mamona/Transporte
<b>DF</b>	Resina MDI/Químicos	PU-mamona/Energia elétrica

Como pode ser observado na Tabela 16, quatro fatores se destacam em primeira colocação em relação as maiores contribuições com os impactos ambientais derivados da cadeia de produção industrial em estudo: fabricação de produtos químicos utilizados na produção de painéis (40%); emissões provenientes da geração de calor na planta industrial a partir da queima de biomassa residual (30%); produção de resina MDI (20%) e, finalmente, produção de energia elétrica brasileira (10%). Os fatores que se destacaram em segunda colocação como maiores contribuintes foram a produção de resina MDI (60%) e atividades de operações florestais (20%), enquanto que a produção dos químicos e a geração de calor na planta industrial ficaram cada um com 10%.

Os fatores contribuintes identificados estão de acordo com outros estudos disponíveis na literatura em que diferentes painéis compósitos à base de madeira foram previamente analisados em uma perspectiva ambiental (GONZÁLEZ-GARCÍA et al. 2009; RIVELA et al., 2006; SILVA et al., 2013).

Em relação aos produtos químicos utilizados na cadeia de produção de OSB, o piretróide, composto orgânico que constitui o inseticida, é aplicado nos painéis para protegê-los contra o ataque de organismos decompositores como fungos e cupins. Tal produto foi identificado como um dos principais “*hotspots*” ambientais. A produção do inseticida piretróide contribui, principalmente, para categorias de impacto como DO, EA, TH e ETa, e em segunda colocação na categoria DF. Se for comparado com outros estudos de ACV focados na produção de OSB em outros países, como Estados Unidos (KLINE, 2010) e Canadá (PUETTMANN et al., 2012), somente no sistema de fabricação brasileiro ocorre a aplicação de inseticida no painel. Obviamente é importante destacar que tais países não possuem tantos problemas com organismos deterioradores como o Brasil. Todavia, pode-se considerar a aplicação de outros produtos químicos com função de proteção.

Estudos como de Murpht et al. (1995), Sean et al. (1999) e Xu et al. (2013) consideraram a aplicação de produtos à base de boro na produção de OSB para melhorar sua resistência ao ataque desses organismos. Ainda, um estudo realizado por Ferro et al. (2016) mostra que o uso da resina PU-mamona na fabricação de OSB se mostrou eficaz contra o ataque de cupim de madeira seca quando comparado com OSB comercial e madeira da espécie de *Pinus* sp.

A planta industrial brasileira de produção de OSB gera uma grande quantidade de energia na unidade de combustão de biomassa (aproximadamente 92% da energia utilizada). Essa geração mostrou-se como principal contribuinte para as categorias de impacto: AT, EM e FOF. O processo também pode ser considerado um “*hotspot*” ambiental em consonância com outros estudos de ACV para painéis compósitos à base de madeira, principalmente devido às emissões de combustão (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2009 e KLINE, 2010). Silva et al. (2013) analisaram a produção do MDP brasileiro a partir de uma perspectiva de ACV e consideraram quatro alternativas de combustível para gerar energia: óleo pesado, diesel, resíduos de madeira, bem como uma mistura de diesel e resíduos de madeira. O resultado mostrou que o uso de apenas resíduos de madeira como combustível apresentou menores impactos para as categorias analisadas (acidificação, eutrofização, depleção abiótica, oxidação fotoquímica e aquecimento global). Portanto, as possibilidades focadas no uso de combustíveis alternativos na unidade de geração de calor foram excluídas para consideração. Com relação à produção de resina MDI, o uso de petróleo bruto em seu processo de fabricação contribui consideravelmente para impactos como MC e DF, e ainda se destaca como segundo maior responsável por categoriais: DO, AT, EM, FOF, ET e ETa. Uma melhoria notável poderia ser alcançada se a resina MDI fosse substituída. Como primeira alternativa, pensou-se na resina PU-mamona, utilizada em diversos estudos no âmbito de painéis a base de madeira (BATTISTELLE et al., 2010; BERTOLINI,

2012; FERRO, 2013; FIORELLI et al., 2015; MACEDO et al., 2016, NASCIMENTO et al., 2015; SILVA et al., 2015; SOUZA, 2012; VARANDA, 2012). Entretanto, na ACV da produção de OSB laboratorial, a resina PU-mamona foi a principal contribuinte por 80% das categorias de impactos (exceto para ET). Quando comparada com a produção industrial, a produção laboratorial foi responsável por maiores impactos potenciais em três categorias (MC, ET e DF), sendo a resina PU-mamona caracterizada como principal responsável pela ocorrência desses maiores valores. Tal resultado se deve à maior porcentagem de resina PU-mamona (em relação à massa de partículas) adicionada ao painel, quando comparada com a indústria. Para que os impactos ambientais potenciais na fabricação do OSB em escala laboratorial sejam menores, deve-se adotar no máximo 8% de resina na fabricação dos painéis. Para isso, novos estudos deverão ser realizados a fim de verificar a influência do novo teor de resina nas propriedades físico-mecânicas dos OSB. Contudo, Ferro et al. (2015) fabricaram OSB com partículas de madeira da espécie Paricá (com densidades próxima a madeira deste estudo) e com 8% de resina PU-mamona e encontraram resultados compatíveis aos exigidos pela EN 300 (2006) para aplicações em diversos setores da construção civil.

Vale a pena ressaltar também o uso e a avaliação de outras bio-resinas, como à base de taninos e lignina (DEWAR, 2007). No entanto, é indispensável a avaliação do seu efeito sobre as propriedades físicas e mecânicas do painel, pois a substituição de resina de MDI por bio-resinas pode alterar as propriedades técnicas do painel (SILVA et al., 2012).

Por fim, as atividades relacionadas às operações florestais se destacam como segundo maior contribuinte para as categorias EA e TH, principalmente devido à utilização dos fertilizantes. Com o desuso dos fertilizantes nos tratamentos silviculturais do *Pinus*, espera-se redução dos impactos de 26 e 30% em tais categorias, respectivamente. Ainda, observou-se que a utilização da madeira proveniente de desbaste pode ser alternativa para redução dos impactos neste subsistema, apresentando redução de até 67% para a categoria ETa.

Para o subsistema OPP<sub>i</sub>, destacam-se na Tabela 16 apenas dois fatores contribuintes, a produção da resina PU-mamona (90%) e o uso da energia elétrica.

Como mencionado, a adoção do teor de resina de 12% se justifica pelos bons resultados encontrados na literatura. Para o cálculo da quantidade de resina a ser adicionada em cada painel, são considerados 3% a mais, devido às perdas durante o processo, principalmente na etapa de aplicação nas partículas.

O uso da resina PU-mamona apresentou-se como principal contribuinte nos impactos ambientais em 9 das 10 categorias analisadas, sendo elas: MC, DO, AT, EA, EM, TH, FOF,

ETa e DF sobretudo devido ao grande percentual quando comparado com a indústria (4%). Logo, para que os impactos ambientais potenciais na fabricação do OSB em escala laboratorial sejam menores que na escala industrial, deve-se adotar no máximo 8% de resina, considerando-se as perdas.

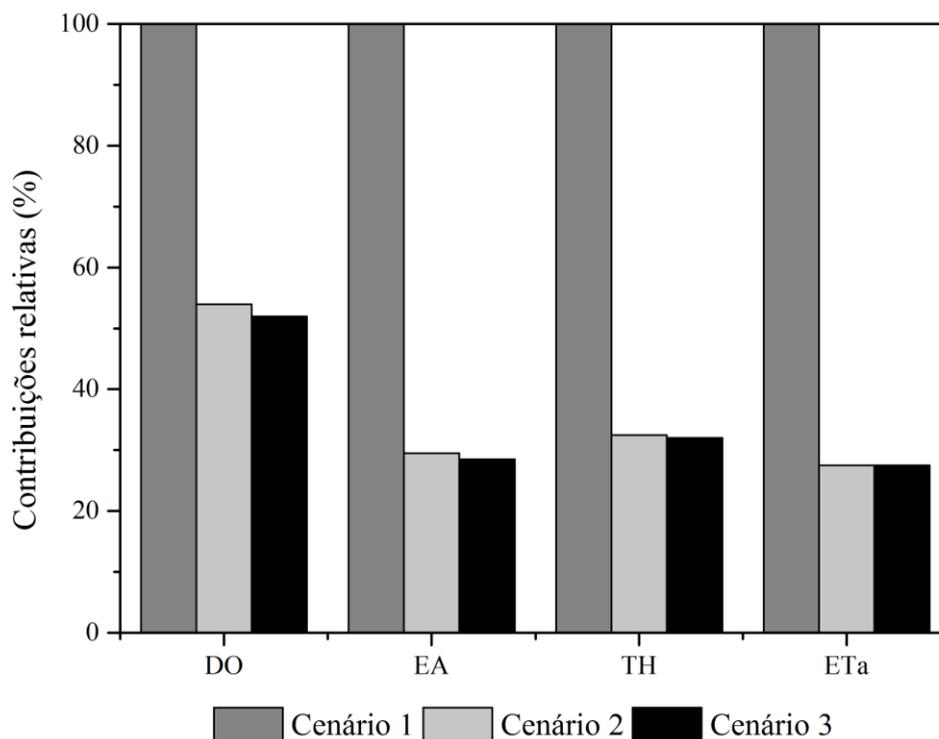
#### 4.2.4.1 Análise de cenário: substituição do inseticida piretróide por compostos de boro

Com base em três estudos disponíveis na literatura, Murphy et al. (1995), Sean et al. (1999) e Xu et al. (2013) que utilizaram inseticida a base de boro para melhorar a resistência do OSB ao ataque de organismos decompositores, dois cenários alternativos foram propostos a fim de analisar e comparar seus correspondentes perfis ambientais com o desse estudo. Esses cenários alternativos basearam-se no uso de borato de cálcio (Cenário 2) e borato de sódio (Cenário 3) como alternativas ao uso do inseticida de piretróide (Cenário 1).

Para o Cenário 1 foi considerado o atual sistema de produção brasileiro de OSB, onde são utilizados 0,98 kg de inseticida piretróide por unidade funcional (1 m<sup>3</sup> de OSB). Em relação aos Cenários 2 e 3, assumiu-se que a quantidade de borato de cálcio e borato de sódio aplicada foi a recomendada por Murphy et al. (2005) e Xu et al. (2013), respectivamente. Para a adequada proteção ao ataque de térmitas e fungos, é necessário a aplicação de 10,3 kg de borato de cálcio e 0,5 kg de borato de sódio para a produção de 1 m<sup>3</sup> de OSB “*home*”.

A Figura 47 apresenta a comparação dos perfis ambientais para os três cenários propostos para análise. As categorias de impactos analisadas foram apenas DO, EA e TH e ETa, uma vez que foram as categorias de impacto mais afetadas pela produção do inseticida piretróide, conforme indicado anteriormente.

**Figura 47** - Avaliação comparativa do impacto ambiental de três cenários para aplicação de inseticida na produção do OSB “home”



Fonte: Próprio autor.

Como pode ser visto na Figura 47, não há importantes diferenças nos impactos entre os cenários 2 e 3, independentemente da categoria analisada em estudo, não sendo superior a 2% no cenário 2 em comparação com o Cenário 3. No entanto, quando os cenários 2 e 3 são comparados com o cenário 1, seus perfis ambientais apresentaram alta redução, variando entre 29 e 43%, dependendo da categoria.

O melhor desempenho ambiental está associado à EA. Nesta categoria de impacto, redução de 43% foi alcançada através do uso do inseticida a base de borato de sódio como alternativa ao piretróide e de 41% se considerar o inseticida de borato de cálcio. As reduções dos impactos para esta categoria estão relacionadas principalmente com os requisitos de energia associados à produção de cada tipo de inseticida e com as diferenças nos índices necessário para a preservação do painel. Na produção do piretróide, são necessárias grandes quantidades de calor e são produzidas no local a partir de combustíveis fósseis. No entanto, na produção de ambos os inseticidas a base de boro, são consumidas grandes quantidades de eletricidade que são retiradas da rede. Com relação a quantidade necessária de cada tipo de inseticida, cerca de 1 kg de inseticida piretróide é requerido no cenário 1. No entanto, 10,3 e 0,5 kg do inseticida à

base de borato de cálcio e borato de sódio são consumidos nos cenários 2 e 3, respectivamente.

A melhoria ambiental em termos de TH está relacionada com a quantidade de energia consumida e os melhores perfis ambientais foram obtidos para os inseticidas a base de boro. Os melhores perfis ambientais estão associados aos requisitos energéticos dos processos produtivos. No que diz respeito à DO, os melhores perfis ambientais também estão associados ao cenário 2 e 3, sendo os impactos relacionados à essa categoria aproximadamente 30% inferior em relação ao cenário 1. Para a produção do inseticida piretróide, o componente  $\text{CCl}_4$  é usado como matéria-prima, sendo o principal responsável pelo alto nível de impacto nesta categoria.

Considerando os resultados obtidos, a substituição do inseticida piretróide por outros à base de boro, como o borato de cálcio e borato de sódio, pode ser considerado uma alternativa pela indústria brasileira de OSB para melhorar o perfil ambiental deste produto. No entanto, análises adicionais fazem-se necessárias, especificamente em termos de propriedades físicas e mecânicas dos painéis, bem como em termos de resistência a degradação biológica.

## 5 CONCLUSÕES

Materiais alternativos como madeira proveniente de desbaste e resina PU-mamona foram testados na fabricação de OSB e avaliados em relação às propriedades físicas, densidade, teor de umidade, inchamento em espessura e absorção de água após 2 e 24h de imersão e mecânicas, módulo de elasticidade e módulo de ruptura na flexão estática na direção paralela e perpendicular à orientação das partículas e adesão interna. Além disso, a fabricação destes painéis nas escalas laboratorial, bem como a industrial, foi avaliada por intermédio da metodologia ACV, e os principais “hotspots” foram identificados. As conclusões foram divididas em duas partes: a primeira diz respeito aos resultados obtidos nos ensaios físicos e mecânicos dos OSB produzidos, e a segunda parte é referente aos resultados obtidos na ACV.

### 5.1 Caracterização física e mecânicas dos OSB

Baseando-se na metodologia aplicada e nos resultados obtidos para os OSB fabricados com partículas de madeira de *Pinus* sp. provenientes de desbastes e resina PU-mamona, foi possível concluir:

- Com relação às propriedades físicas, os OSB foram classificados como painéis de média densidade, com valores equivalentes à densidade dos OSB comerciais. Considerando-se o teor de umidade, obtidos encontram-se dentro dos recomendados por norma e, além disso, os resultados alcançados são compatíveis aos apresentados em trabalhos correlatados;
- Para as propriedades inchamento em espessura e absorção de água nos períodos de 2 e 24 horas, constatou-se que a proporção dos componentes polioliol e pré-polímero apresentaram influência nestas propriedades, sendo a condição experimental C1 (proporção 1:1 entre polioliol e pré-polímero, respectivamente) a que apresentou melhores desempenhos, ou seja, menores valores de inchamento em espessura e absorção de água para os períodos avaliados. As condições experimentais C2 (1,25:0,75) e C3 (1,5:0,5) apresentaram resultados equivalentes, mostrando que a redução do componente pré-polímero não causou influência significativa nestas propriedades. Os painéis referentes às três condições experimentais são destinados, segundo a EN 300 (2006), à aplicação em ambientes secos (situação mais usual com relação às aplicações práticas dos OSB);

- Em termos de propriedades mecânicas dos painéis, para as propriedades MOE e MOR no sentido paralelo à orientação das partículas, constatou-se que a influência da proporção entre os componentes da resina foi significativa em tais propriedades. Os painéis fabricados com maiores teores de isocianato (C1 e C2) tiveram melhores desempenhos em relação à condição experimental C3. No entanto, apesar das diferentes categorizações normativas recebidas pelos tratamentos (OSB/4 e OSB/3) ambas são destinadas para fins estruturais. Para o MOE e MOR no sentido perpendicular à orientação das partículas, também houve influência nestas propriedades, sendo que os painéis referentes à condição experimental C3 não foi classificado normativamente para aplicações estruturais;
- Observou-se que a propriedade resistência à tração perpendicular às faces também sofreu influência da proporção dos componentes da resina PU-mamona. Porém, ambas as categorizações definidas pela EN 300 (2006), OSB/4 e OSB/3, são de painéis destinados a aplicações estruturais;
- Por fim, constatou-se que é viável o uso de madeira proveniente de desbaste para fabricação de OSB, sendo uma forma de agregar valor as mesmas;

Ficou, portanto, constatada na maioria dos casos (exceto para a propriedade inchamento em espessura após 24h), a equivalência estatística entre as propriedades físicas e mecânicas entre as condições C1 e C2 investigadas, implicando os painéis produzidos com a proporção de 1,25:0,75 (C2), entre os componentes polioliol e pré-polímero, respectivamente, a melhor condição, por apresentar resultados compatíveis com normas para aplicação estrutural e ao OSB “home” (o qual foi também objeto de estudo da ACV), e por utilizar menor quantidade do componente isocianato. Sendo assim, a condição experimental C2 foi selecionada para o desenvolvimento da ACV.

## **5.2 Avaliação do ciclo de vida dos painéis em escala laboratorial e industrial**

Uma avaliação do ciclo de vida (ACV) do tipo “*cradle-to-gate*” foi realizada para produção de OSB no Brasil, considerando duas escalas: laboratorial e industrial. Os pontos ambientais durante o ciclo de vida da cadeia de fabricação OSB foram identificados e as possíveis alternativas de melhoria foram analisadas. A produção do OSB foi dividida em dois subsistemas: Operações florestais (OF) e Operações de produção do painel (OPP), para ambas

as escalas analisadas.

- Quando comparados os subsistemas, o OPP foi identificado como o responsável mais importante dos encargos ambientais, com contribuição global de 90%, independentemente da categoria de impacto analisada;
- O subsistema OF foi ainda dividido em OF<sub>1</sub> (madeira proveniente de desbaste) e OF<sub>i</sub> (plantio de *Pinus* destinado à produção de painéis). Em ambos os subsistemas, os principais “hotspots” identificados foram: alto consumo de diesel pelos equipamentos florestais na etapa de Colheita florestal e utilização de fertilizantes. No que diz respeito à Colheita florestal, há uma contribuição notável em todas as categorias de impacto analisadas neste estudo, com índices variando de 21,6% (EA) a 76,2% (FOF), sendo o principal responsável pelas emissões em oito das dez categorias analisadas neste estudo: MC, DO, AT, EM, TH, FOF, ET e DF. O uso de fertilizantes nos tratos silviculturais do plantio de *Pinus* foram os maiores contribuintes para os impactos nas categorias EA e ETa, principalmente devido ao uso do fertilizante superfosfato. Todavia, o uso de fertilizantes na produção da madeira de *Pinus* está sendo abolido e pode-se observar que sua eliminação proporcionou redução de até 25,5% para a categoria EA e 30% para a categoria ETa, subsistema OF<sub>i</sub>;
- A utilização da madeira proveniente de desbaste é alternativa para redução dos impactos neste subsistema, apresentando redução de até 67% para a categoria ETa. Assim, configura-se como boa opção para redução dos impactos ambientais potenciais associados ao subsistema OF, além de ser uma forma de agregar valor a este resíduo florestal, geralmente queimado para gerar energia;
- O subsistema OPP também foi dividido em dois subsistemas OPP<sub>1</sub> (escala laboratorial) e OPP<sub>i</sub> (escala industrial). Para OPP<sub>i</sub> em 40% das categorias avaliadas (DO, ET, TH e ETa) o maior responsável pelas emissões foi a produção dos produtos químicos aplicados aos painéis, sobretudo o inseticida piretróide. A combustão de resíduos de biomassa para geração de calor na planta industrial apareceu com o principal responsável em 30% das categorias, AT, EM, e FOF. A produção da resina MDI foi o maior participante em 20% das categorias, como MC e DF;
- Para o subsistema OPP<sub>1</sub>, os “hotspots” identificados foram: a produção de resina PU-

mamona, principalmente o componente isocianato, e o uso de energia elétrica. No que diz respeito à produção da resina PU-mamona, esta foi responsável em nove das dez categorias analisadas: MC, DO, AT, EA, EM, TH, FOF, ETa e DF. Os altos impactos se justificam pelo teor de resina utilizado na fabricação dos painéis em laboratório, em relação à escala industrial. Quanto ao uso de energia elétrica, estas se justificam pela composição do mix energético brasileiro que depende em parte de fontes renováveis, principalmente bagaço de cana-de-açúcar.

- Quando comparados os subsistemas  $OPP_I$  e  $OPP_i$ , observa-se que, em três das dez categorias analisadas, os impactos potenciais foram maiores para o subsistema  $OPP_I$ , sendo elas: MC, ET e DF com índice de superioridade em relação ao subsistema  $OPP_i$  de até 45,6% para a categoria de impacto DF. Os maiores valores de impactos associados ao subsistema  $OPP_I$  são devidos ao maior teor de resina utilizado na produção do OSB laboratorial;
- O uso de inseticidas a base de boro pode ser uma alternativa ao uso de inseticidas piretróide na fabricação de OSB. Os resultados mostram que melhorias notáveis podem ser obtidas em termos de DO, EA, TH e ETa com índices de redução variando de 30 a 43% em relação ao atual cenário brasileiro.
- Como foi abordado neste trabalho, vários estudos na literatura destacam o uso da resina PU-mamona como alternativa a resinas comerciais como ureia-formaldeído, fenol-formaldeído e MDI. Contudo, após a realização deste estudo, ficou constado que o uso da resina PU-mamona pode contribuir consideravelmente com os impactos negativos ambientais.

### 5.3 Sugestões para trabalhos futuros

- Com relação a presença de algumas limitações relacionadas ao desenvolvimento de ACV, como adoção de algumas informações a partir de base de dados, sugere-se a realização da ACV no Brasil, utilizando outros softwares disponíveis, além de dados brasileiros, e comparar os resultados obtidos com os resultados deste estudo.
- Como mencionado, para que os impactos ambientais potenciais do uso da resina PU-mamona sejam equivalentes ao OSB produzido industrialmente, é necessário que o teor

de resina aplicado nos painéis seja de no máximo 8%. Todavia, tal redução pode afetar as características físico-mecânicas dos painéis. Sendo assim, recomenda-se caracterização física e mecânica de OSB com 8% de resina PU-mamona.

- Foi visto que o inseticida piretróide foi o principal responsável pelos impactos em 40% das categorias analisadas, e que estudos mostram o bom desempenho da resina PU-mamona ao ataque de organismos deterioradores como o cupim. Sendo assim, recomenda-se o teste de degradação biológica em OSB comerciais do tipo “home” e em painéis fabricados com resina PU-mamona.
- As áreas reflorestadas do gênero *Eucalyptus* estão crescendo nas regiões Sudeste e Sul do país, e em conversa com funcionários da empresa procurada de OSB, foi revelado o interesse por espécies desse gênero. Estudos mostram que o gênero *Eucalyptus*, quando utilizado na fabricação de OSB, proporciona resultados satisfatórios em relação ao desempenho físico-mecânico dos painéis. Logo, um estudo comparando o desempenho ambiental de espécies desse gênero com o de *Pinus* seria muito interessante.



## REFERÊNCIAS

- AKRAMI, A.; BARBU, M. C.; FRUEHWALD, A. Characterization of properties of oriented strand boards from beech and poplar. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 72, n. 3, p. 393-398, 2014.
- ALBUQUERQUE, C. E. C.; MENDES, L. M. OSB - Processo industrial e considerações. **Revista da madeira**. n. 46, p. 22 – 26, 2000.
- ALBUQUERQUE, H. A. A. **Utilização de polímeros comerciais para a produção de painéis de madeira de baixa densidade**. 2010. 96f. Dissertação (Mestrado). Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2010.
- ALTHAUS, H.J. et al. **Life Cycle Inventories of Chemicals**. Ecoinvent report No. 8. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf (Switzerland), 2007.
- ALVARENGA, R. A. F. **Avaliação de métodos de AICV: Um estudo de caso de quatro cenários de ração para frangos de corte**. 2010. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD . **ANSI/A 208.1**: Mat-formed wood particleboard:Specification. Gaithersburg:National Particleboard Association, 1993. 9p.
- ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **Life-cycle thinking for the oil and gas exploration and production industry**.Illinois, EUA, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BAIANA DAS EMPRESAS DE BASE FLORESTAL -ABAF. **Bahia Florestal Anuário ABAF 2013**. p. 1–4, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE - ABIMCI. (2013). **Dados do setor**. Disponível em: <<http://www.abimci.com.br/pt/>>. Acesso em: 11 abr. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA- ABIPA. **Programa setorial da qualidade de painéis de partículas de madeira (MDP) e painéis de fibras de madeira (MDF)**. Disponível em: <[file:///C:/Users/Bia%20Ferro/Downloads/pbqph\\_d2641.pdf](file:///C:/Users/Bia%20Ferro/Downloads/pbqph_d2641.pdf)>. Acesso em: 11 abr. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009a. 51p.
- \_\_\_\_\_. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009b. 27p.
- \_\_\_\_\_. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. **NBR 14810-2**: Painéis de partículas de média densidade. Parte 2: Requisitos e

métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico da ABRAF 2013 - ano base 2012**. Brasília: STCP Engenharia de Projetos, 2012.

ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS- A Indústria de Base Florestal no Rio Grande do Sul- Ano base 2015. Disponível em: <<http://www.ageflor.com.br/noticias/wp-content/uploads/2016/09/AGEFLOR-DADOS-E-FATOS-2016.pdf>> Acesso em: 23 fev 2016.

ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE. **A cradle-to-gate life cycle assessment of Canadian Medium Density Fiberboard (MDF)**. Ottawa. 2009.

AYRILMIS, N.; BUYUKSARI, U.; AVCI, E. Utilization of waste tire rubber in manufacture of oriented strandboard. **Waste Management**, v. 29, n. 9, p. 2553-2557, 2009.

BAO, S. et al. Solid state two-dimensional NMR studies of polymeric diphenylmethane diisocyanate (PMDI) reaction in wood. **Forest products journal**, v. 53, n. 6, p. 63, 2003.

BARBOSA JÚNIOR, A. F. et a. Conceitos e aplicações de Análise do Ciclo Vida (ACV) no Brasil. **Revista Gerenciais**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 39-44, 2008.

BASTOS, E. F. **Caracterização física e mecânica de painel OSB do tipo Form**. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

BATTISTELLE, R. et al. Caracterização física das chapas de partículas com os rejeitos oriundos da cana-de-açúcar e das folhas de bambu. 2010. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA -EBRAMEM, 12...**Anais**. Lavras, [s.n.]. CD - ROM.

BAUMANN, H.; TILLMAN, A. **The Hitch Hiker's Guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application**. External organization, 2004.

BEDANTE, G. N. **A influência da consciência ambiental e das atitudes em relação ao consumo sustentável na intenção de compra de produtos ecologicamente embalados**. 2004. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

BENETTO, E.; BECKER M.; WELFRING, J. Life Cycle Assessment of Oriented Strand Boards (OSB): from Process. Innovation to Ecodesign. **Environmental Science Technology**, v.43, p. 6003–6009, 2009.

BERTOLINI, M. S et al. Painéis de partículas provenientes de rejeitos de *Pinus* sp. Tratado com preservante CCA e resina derivada de biomassa. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 38, n. 2, p. 339-346, 2014.

BERTOLINI, M. S. **Emprego de resíduos de *Pinus* sp. tratado com preservante CCB na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretana à base de**

**mamona**. 2011.129 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.  
BIAZUS, A.; HORA, A. B.; LEITE B. G. P. Panorama de mercado: painéis de madeira. **BNDES setorial** 32, p. 49-90, 2010.

BORTOLETTO JR, G.; GARCIA, J. N. Propriedades de resistência e rigidez à flexão estática de painéis OSB e compensados. **Revista Árvore**, v.28, n.4, p.563-570, 2004.

BORTOLETTO JÚNIOR G. Estudo de algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus merkusii*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 237-243, 2008.

BOVEA, M. D.; GALLARDO, A. The influence of impact assessment methods on materials selection for eco-design. **Materials & Design**, v. 27, n. 3, p. 209-215, 2004.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Plano Brasil Maior: plano 2011/2014. Brasília: Mdic, 2014. Disponível em: [http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6685/1/td\\_2205.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6685/1/td_2205.pdf). Acesso em: 12 out. 2015.

BRITO, E. O.; SILVA, G. C. Propriedades de chapas de partículas produzidas a partir de Gmelina arborea Linn Roxb. e Samanea saman (Jacq.) Merr. **Floresta e Ambiente**, v. 9, n. 1, p. 127-134, 2002.

BUCKLEY, C. J. et al. Examination of the penetration of polymeric di-phenyl-diisocyanate (pMDI) into wood structure using chemicalstate x-ray microscopy. **Holzforschung**, v. 56, p. 215-222, 2002.

BUFALINO, L. et al. Alternative compositions of oriented strand boards (OSB) made with commercial woods produced in Brazil. **Maderas. Ciencia y tecnologia**, v. 17, p. 105 – 116, 2015.

CABRAL, C. P. T. et al. Propriedades de chapas tipo OSB, fabricadas com partículas acetiladas de madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus cloeziana* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, v.30, n.4, p.659-668, 2006.

CALIL JUNIOR, C. **O Potencial do uso da madeira de *Pinus* na construção civil**. 2002PiniWeb, São Paulo, 10 abr. Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br/construcao/noticias/opotencial-do-uso-da-madeira-de-pinus-na-construcao-81480-1.asp>>. Acesso em: 10 abril de 2016.

CARVALHAES E. Presidente da Iba analisa mercado de painéis. 2016. Disponível em: <http://www.emobile.com.br/site/industria-e-marcenaria/presidente-executiva-da-iba-analisa-mercado-de-paineis/>. Acesso em: 15 jul 2016.

CARVALHO, G. A. et al. Desempenho de painéis OSB com adesivos comerciais e tânico de barbatimão. **Revista Árvore**, v. 39, n. 6, p.1155-116, 2015.

CASTRO, R. V. O. et al. Avaliação econômica de um povoamento de eucalipto desbastado e destinado a multiprodutos da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 91, n.39, p.351-357, 2011.

CAVALETT, O. et al. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 18, n.3, p. 647-658, 2012.

CAVDAR, A. D.; KALAYCIOGLU, H.; HIZIROGLU, S. Some of the properties of oriented strandboard manufactured using kraft lignin phenolic resin. **Journal of materials processing technology**, v. 202, n. 1, p. 559-563, 2008.

CHAN, G. **Sustainability assessment of OSB and softwood plywood manufacturing in North America**. 2012. Disponível em: [http://circle.ubc.ca/bitstream/handle/2429/42791/Chan\\_George\\_WOOD\\_493\\_Project\\_2012.pdf?sequence=1](http://circle.ubc.ca/bitstream/handle/2429/42791/Chan_George_WOOD_493_Project_2012.pdf?sequence=1). Acesso em: 12 de mar 2015.

CHAOWANA, P. Bamboo: An alternative raw material for wood and wood-based composites. **Journal of Materials Science Research**, v. 2, n. 2, p. 90, 2013.

CHAUHAN, M. K.; CHAUDHARY, S.; KUMAR, S. Life cycle assessment of sugar industry: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, n.7, p. 3445-3453, 2011.

CHEHEBE, J.R. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. QualitymarkEditoraLtda, 1997.

CHEN, Q. et al. Hydrogen bonding interactions in polyureas as studied by variable-temperature high-resolution <sup>1</sup>H NMR spectroscopy. **Journal of Molecular Structure**, v. 471, p. 183-188, 1998.

CHERUBINI, E.; RIBEIRO, P. T. Diálogos Setoriais Brasil e União Europeia: desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil. Brasília: **Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - IBICT**, 2015.

CHERUBINI, F.; JUNGMEIER, G. LCA of a biorefinery concept producing bioethanol, bioenergy, and chemicals from switchgrass. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 1, p. 53-66, 2010.

CHIPANSKI, E. R. **Proposição para melhoria do desempenho ambiental da indústria de aglomerado no Brasil**. 2006. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS – CIFLORESTAS.n **Pinus**. 2008. Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br/texto.php?p=pinus>>. Acesso em: 20 jul. 2016.

CLOUTIER, A. Oriented Strand Board (OSB): raw material, manufacturing process, properties of wood - base fiber and particle materials. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON SOLID WOOD PRODUCTS OF HIGH TECHNOLOGY, 1., **Anais**. Belo Horizonte, SIF, 1998, p. 173 – 185.

COELHO FILHO, O.; SACCARO JUNIOR, N. L.; LUEDEMANN, G. **Avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2016.

COLTRO, L. (org). **Avaliação de Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 2007. 72 p, 2007.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso Futuro Comum**. 2 ed. Rio de Janeiro: **Editora da Fundação Getúlio Vargas**, 1991.

CORNELISSEN, R. L.; HIRS, G. G. The value of the exergetic life cycle assessment besides the LCA. **Energy conversion and management**, v. 43, n. 9, p. 1417-1424, 2002.

DAVIS, M. **3 myths about product life cycle assessments**. Greenbiz, 17 May, 2013. Disponível em: [http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6685/1/td\\_2205.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6685/1/td_2205.pdf). Acesso em: 12 out. 2015.

HAES, H. U. et al. (2002). Life cycle impact assessment: striving towards best practice. **SETAC Press Proceedings**, 2002.

DEWAR, J. **Review of existing bioresins and their applications**. Building Research Establishment Ltd, 2017.

DIAS, A. N. **Modelagem e avaliação econômica de plantações de Eucalipto submetidas a desbastes**. 2000. 82 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. 2005. 151f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

Dias, A. C.; Arroja, L. Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal. **Journal of Cleaner Production**, v.37, 368-376, 2012.

DIAS, L.B. et al. Incorporação das fibras oriundas do epicarpo do coco de babaçu como insumo alternativo para produção de painéis de OSB. In: 22 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS – CBECIMAT, Natal –RN, 2008. **Anais...** Natal: [s.n.]. CD - ROM.

DOKA, G. Life cycle inventories of waste treatment services. **Ecoinvent report No. 5**. Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf (Switzerland), 2009.

DONES, R. et al. **Life cycle inventories of energy systems**: results for current systems in Switzerland and other UCTE countries. Ecoinvent report No. 5. Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf (Switzerland), 2007.

EISFELD, C. L.; BERGER, R. Análise das estruturas de mercado das indústrias de painéis de madeira (compensado, MDF e OSB) no estado do Paraná. **Floresta**, v. 42, p. 21 - 34, 2012.

EPA. Wood Products Industry. Retrieved from Technology Transfer Network Clearinghouse for Inventories and Emissions Factors. 2015. Disponível em: [http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch\\_10/index.html](http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch_10/index.html). Acesso em: 15 fev. 2015.

EARLES, J.M.; HALOG, A.; SHALER, S. Improving the environmental profile of wood panels via co-production of ethanol and acetic acid. **Environmental Science Technology**, v. 45, p.

9743–9749, 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 300**: Oriented Strand Boards (OSB) - Definitions, classification and specifications. Portugal, 2006. 20p.

\_\_\_\_\_. **EN 310**: Wood-based panels - Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength, Bruxelas, 2006.

\_\_\_\_\_. **EN 312**: Particleboards Specifications. Bruxelas, 2006.

\_\_\_\_\_. **EN 317**: Particleboards and fibreboards – Determination of swelling in thickness after immersion in water. Bruxelas, 2006.

\_\_\_\_\_. **EN 323**: Wood-based – Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. Bruxelas, 1993.

\_\_\_\_\_. **EN 319**: Particleboards and fibreboards – Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. Bruxelas, 1993.

EVOLUÇÃO E CONDICIONANTES DA GESTÃO AMBIENTAL NAS EMPRESAS  
Renato Santos de Souza. **REAd** – Edição Especial 30 Vol. 8 No. 6, nov-dez 2002.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS. **Forest Products Statistic**. 2013 Global Forest Products Facts and Figures. Rome, 2014.

FAHEY, D. W. et al. The detection of large nitric-acid particles in the winter Arctic stratosphere and their role in denitrification, **Science**, 291, 1026–1031, 2001.

FARRENY, R. et al. Life cycle assessment comparison among different reuse intensities for industrial wooden containers. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 5, p. 421- 431, 2008.

FERREIRA C. A. **Cultivo do Eucalipto**: Manejo de plantações para desdobro. Sistemas de Produção, 4 edição: Embrapa Florestas, 2003.

FERREIRA, J. V. R. **Análise do ciclo de vida dos produtos**. Gestão Ambiental. Instituto Politécnico de Viseu, 2004.

FERRO, F. S. et al. Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) com *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Scientia Forestalis** (IPEF), v. 43, p. 313-320, 2015.

FERRO, F. S. **Painéis OSB com madeira *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana à base de óleo de mamona: viabilidade técnica de produção**. 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

FIORELLI, J. et al. Painéis de partículas monocamadas fabricados com resíduo de madeira e fibra de coco verde. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 175-182, 2015.

FOREST ABSORVING CARBON DIOXIDE EMISSION. **Arnheim**: Netherlands, 1994.  
(Annual

FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook: Wood as an engineering material. General Technical Report. 2012. 190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, **Forest Products Laboratory**, 2012. 508 p.

GARCIA, R. P. **Avaliação comparativa de instrumentos de gestão ambiental do ciclo de vida aplicados a dois sistemas com biomassa: painéis e eletricidade**. 2010. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal, 2010.

GARCIA, R.; FREIRE, F. Carbon footprint of particleboard: a comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration. **Journal Cleaner Production**, v. 66, p.199-209, 2014.

GIANNETTI, B. F. et al. Inventário de ciclo de vida da manufatura de seringas odontológicas. **Produção**, v. 18, n. 1, p. 155-169, 2008.

GOEDKOOOP et al. **A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level**. Report I: Characterization. [S.l.:s.n], 2009.

GOEDKOOOP, M. J.; SPRIENSMA, R. The eco-indicator '99: A damage-oriented method for life-cycle impact assessment," Ministry of VROM, **The Hague** (The Netherlands), 1999.

GONZÁLEZ-GARCÍA S. et al. Environmental Life Cycle Assessment of a Swedish Dissolving Pulp Mill Integrated Biorefinery. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 4, p. 568–583, 2011b.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Cradle-to-gate life cycle inventory and environmental performance of Douglas-fir roundwood production in Germany. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 244-252, 2013a.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Divergences on the environmental impact associated to the production of maritime pine wood in Europe: French and Portuguese case studies. **Science of the Total Environment**, n. 472, p. 324–337, 2014.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Environmental assessment of green hardboard production coupled with a laccase activated system. **Journal Cleaner Production**, v. 19, p. 445-453, 2011a.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Environmental performance assessment of hardboard manufacture. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14, p.456-466, 2009b.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Environmental performance assessment of hardboard manufacture. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14, p. 456–466, 2009a.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. The influence of forest management systems on the environmental impacts for Douglas-fir production in France. **Science of the Total Environment**, v. 461–462, p. 681-692, 2013b.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; BERG, S.; FEIJOO, G.; MOREIRA, M.T. Environmental impacts of production and supply of pulpwood: Spanish and Swedish case studies. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14; n. 4, p. 340–353, 2009b.

GRAND VIEW RESEARCH. **Oriented Strand Board (OSB) Market Worth \$71 Million by 2022**. 2015. <http://www.grandviewresearch.com/press-release/global-oriented-strand-board>. Acesso em 15 dez 2015.

HAES, H. U. et al. **Life cycle impact assessment: striving towards best practice**. SETAC Press Proceedings, 2002.

HAN, G.; WU, Q.; LU, J. Z. Selected properties of wood strand and oriented strandboard from small-diameter southern pine trees. **Wood and fiber science**, v. 38, n. 4, p. 621-632, 2007a.

HAN, G.; WU, Q.; LU, J. Z. The influence of fines content and panel density on properties of mixed hardwood oriented strandboard. **Wood and Fiber Science**, v. 39, n. 1, p. 2-15, 2007b.

HAUSCHILD, M. Z. et al. Building a model based on scientific consensus for life cycle impact assessment of chemicals : the search for harmony and parsimony. **Environmental Science and Technology**, v. 2, p. 7032–7037, 2008.

HAYASHI, K. et al. Development of damage function of acidification for terrestrial ecosystems based on the effect of aluminum toxicity on net primary production. **The International Journal of LCA**, v. 9, p. 3-22, 2004.

HERÄJÄRVI, H. et al. Small-diameter Scots Pine and Birch timber as raw materials for engineered wood products. **International Journal of Forest Engineering**, v. 15, p. 23-34, 2004.

HERMAWAN, A. et al. Manufacture of composite board using wood prunings and waste porcelain stone. **Journal of Wood Science**, v. 55, p.74-79, 2009.

HERMAWAN, A. et al. Manufacture of strand board made from construction scrap wood. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, p. 415-426, 2007.

IDEMAT. **Design for sustainability**. Faculty of Design, Engineering and Production Delft University of Technology. 2001. Disponível em: <http://www.io.tudelft.nl/research/dfs/idemat/index.htm>. Acesso em: 15 dez 2015.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES- IBÁ. **Dados do setor**. 2015. Disponível em: <http://www.iba.org/pt>. Acesso: em 08 abr. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA- IBICT. IBICT fará inventário brasileiro em ACV. 2014. Disponível em: <http://www.ibict.br/ibict-fara-inventario-brasileiro-em-acv/impressao>. Acesso em: 13 nov. 2014.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA- IPT. **Relatório técnico 126 416-205**, São Paulo, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. **ISO 14025:** Environmental labels and declarations - Type III Environmental declarations – Principles and procedures, 2006.

\_\_\_\_\_. **ISO 14040:** Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva, 2006. 20p.

\_\_\_\_\_. **ISO 14044:** Environmental management - life cycle assessment- Requirements and Guidelines. Geneva, 2006. 52p.

\_\_\_\_\_. **ISO TS 14048.** Technical specification – LCA: data documentation format. Geneva, Suíça, 2002. 40 p.

INTERNATIONAL REFERENCE LIFE CYCLE DATA SYSTEM- ILCD. **Handbook.** Luxembourg : European Commission – Joint Research Centre – Institute for Environmental and Sustainability, 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS-IPEF. **Produtividade do Pinus:** Programa de Produtividade Potencial do Pinus no Brasil. 2009. Disponível em: <<http://www.ipef.br/pppib/>>. Acesso em: 04 ago. 2013.

IRLE, M. A. et al. Wood Composites. In: ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites.** Boca Raton: CRC Press, 2012. Cap. 10.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION- ISO. Environmental labels and declarations: type III – Environmental declarations, principles and procedures. **ISO 14025:2006-en.** Geneve: ISO, 2006.

IWAKIRI, S. et al. Utilização da madeira de eucalipto na produção de chapas de partículas orientadas OSB. **Cerne**, v.10, n.1, p.46-52, 2004.

IWAKIRI, S. Painéis de madeira aglomerada. In: IWAKIRI, S. et al. **Painéis de madeira reconstituída.** 2005. Curitiba: FUPEF, p. 158-166, 2005

IWAKIRI, S.; MENDES, L. M.; SALDANHA, L. K. Produção de chapas de partículas orientadas “OSB” de *Eucalyptus grandis* com diferentes teores de resina, parafina e composição em camadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 1, p.89-94, 2002.

JEFFERIES, D. et al. Water footprint and life cycle assessment as approaches to assess potential impacts of products on water consumption. Key learning points from pilot studies on tea and margarine. **Journal of Cleaner Production**, v. 33, p. 155-166, 2012.

JÖNSSON, A.; TILLMAN, A.; SVENSSON, T. Life cycle assessment of flooring materials: case study. **Build environmental**, v. 32, n.3, p.245 – 255, 1997.

JOSA, A. Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 781-788, 2007.

KLEIN, D. et al. 20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art

and a methodical proposal for the LCA of forest production. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 4, p.556-575, 2015.

KLINE, E. Oriented Strandboard – southeast. **CORRIM: Phase I Interim Report**. [S.l:s.n], 2010.

KRALOVEC, A.C., CHRISTENSEN, E.R.; VAN CAMP, R.P. Fossil Fuel and Wood Combustion As Recorded by Carbon Particles in Lake Erie Sediments 1850–1998. **Environmental Science and Technology**, v.36, p.1405–1413, 2002.

LIPPKE, B.; EDMONDS, L. Environmental performance improvement in residential construction: The impact of products, biofuels, and processes. **Forest Product Journal**, v. 56, n. 10, p. 58-63, 2006.

LPBRASIL. **OSB 2016**. Disponível em: <<http://www.lpbrasil.com.br/osb/>>. 16 de set 2016.

MACEDO, L. B. et al. Painéis OSB de madeira de Pinus sp. e edição de partículas de polipropileno biorientado (BOPP). **Scientia Forestalis**, v.44, p. 887-894, 2016.

MALANIT, P.; BARBU, M. C.; FRÜHWALD, A. Physical and mechanical properties of oriented strand lumber made from an Asian bamboo (*Dendrocalamus asper* Backer). **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 69, n. 1, p. 27-36, 2011.

MALINOVSKI, R. A. M. **Métodos silviculturais**. Implantação florestal: preparo do solo. 2011. Disponível em: [http://www.colheitademadeira.com.br/imagens/publicacoes/510/preparo\\_solo\\_alunos.pdf](http://www.colheitademadeira.com.br/imagens/publicacoes/510/preparo_solo_alunos.pdf)>. Acesso em: 1 Out. 2011.

MARKESSINI, C.; ATHANASSIADOU, E.; TSIANTZI, S. Producing panels with formaldehyde emission at wood level. In: EUROPEAN WOOD BASED SYMPOSIUM, 2010, Hannover. **Anais...** Hannover, 2010.

MARRA, A. A. Technology of wood bonding, principle in practice. New York: **Van Nostrand**, p. 453, 1992.

MATTOS, R. L. G. GONÇALVES, R. M. CHAGAS, F. B. Painéis de Madeira no Brasil: panorama e perspectiva. **BNDES setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, mar. 2008. Rio de Janeiro, 2008.

MCDONALD, J.D. et al. Fine Particle and Gaseous Emission Rates from Residential Wood Combustion. **Environmental Science and Technology**, v.34, p. 2080–2091, 2000.

MENDES, F. R. et al. Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 1, 2012.

MENDES, L. M. et al. *Pinus* spp. na produção de painéis de partículas orientadas (OSB). **Ciência Florestal**, v. 12, n. 2, p.135-145, 2002.

MENDES, L.M.; ALBUQUERQUE, C.E.C. Aspectos técnicos e econômicos da indústria brasileira de chapas de fibras e partículas. **Revista da Madeira**, n.53, p.14-22, 2000.

MENDES, N. C. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para aplicação no Brasil**. 2013. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) –Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MENDES, R. F. **Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB**. 2011. 116p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MICHELSEN O. Assessment of land use impact on biodiversity. **International Journal of Life Cycle**, 2008.

MIRSKI, R.; DZIURKA, D. The utilization of chips from comminuted wood waste as a substitute for flakes in the oriented strand board core. **Forest Products Journal**, v. 61, p. 473–477, 2011.

MITCHELL, A.; STEVENS, G. Life cycle assessment of closed loop MDF recycling: microrelease trial – final report. 2009. Disponível em: <http://www.wrap.org.uk/content/life-cycle-assessment-closed-loop-mdf-recycling-microrelease-trial>. Acesso em: 23 de Maio 2015.

MONTEIRO, M. F. **Avaliação do ciclo de vida do fertilizante superfosfato simples**. 2008. 194 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

MORETTI, T. V. **Método de avaliação da estrutura de inventários de ciclo de vida: análise para casos brasileiros**. 2011. 112f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard**. London: Southern Illinois University Press, 1974.

MOTTA, W. H. **Ciclo de vida do produto e a geração de EcoInovações: desafios para o Brasil**. 2016. 218 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MURPHY, R. J.; BARNES, H.M.; GRAY, S.M. Decay and soil depletion studies with polymer/boron preservatives system. **Forest Product Journal**, v. 45, n. 9, p. 77-81, 1995.

NASCIMENTO, M. F. et al. Painéis OSB fabricados com madeiras da caatinga do nordeste do Brasil. **Ambiente construído**, v. 15, p. 41-48, 2015.

NASCIMENTO, M. F.; MORALES, E. A. M. Fabricação de painéis OSB com madeira proveniente de espécies de madeira da caatinga do nordeste brasileiro. LAHR, F. A.R. **Produtos Derivados da Madeira**. São Carlos. Cap.06, p. 119 – 136, 2008.

NEBEL, B.; ZIMMER, B.; WEGENER, Z. Life cycle assessment of wood floor coverings. A representative study for the German flooring industry. **International Journal Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 3, p. 172–182, 2006.

- NEIMSUWAN, T. **Effect of resin and wax ratio on OSB properties**. 2004. 118f. Dissertação (Mestrado). Universidade de Tennessee, 2004.
- NEUPANE, B.; HALOG, A.; DHUNGEL, S. Attributional life cycle assessment of woodchips for bioethanol production. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6, p. 733-741, 2011.
- NOGUEIRA, G.S. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de Eucalyptus sp. e de Tectona grandis submetidos a desbaste**. 2003. 145p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.
- OBINO, C. R.; MENEZES, L. F. Manejo de florestas para serraria nas empresas nacionais: algumas experiências de manejo de eucalipto para serraria. In: seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, 1, São Paulo. **Anais... . São Paulo: Scientia Forestalis**, 1995. p. 140 – 147, 1995.
- ONEIL, E. E. et al. Life-cycle impacts of inland northwest and northeast/north central forest resources. **Wood and Fiber Science**, v. 42, p. 29-51, 2010.
- PENNINGTON, D. W. et al. Life cycle assessment (Part 2): Current impact assessment practice. **Environment International**. v. 30, n. 5, p. 721–739, 2004.
- PEREIRA, J. C.D. et al. Características da madeira de algumas espécies de Eucalipto plantadas no Brasil. **Comunicado Técnico EMBRAPA Florestas**, Colombo, n. 38, p.1-112, 2000.
- PEREIRA, R. S. **Marketing Ambiental**. Congresso Virtual Brasileiro de Administração, 2004.
- PETERSEN, A.K.; SOLBERG, B. Substitution between floor constructions in wood and natural stone: comparison of energy consumption, greenhouse gas emissions, and costs over the life cycle. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 33, p. 1061–1075, 2003.
- PIEKARSKI, C. M. **Proposta de melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF**. 2013.148 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2013.
- PIEKARSKI, C. M. et al. Análise do perfil ambiental da produção de painéis MDF: estudo em uma condição tecnológica brasileira. **Cerne**. V .20, n.3, p. 409-418, 2014.
- PIVA, R. D. Processo de Fabricação de móveis sob encomenda. Rio Grande do Sul: **Centro Tecnológico do Mobiliário**, 155 p, 2006.
- PRE-SUSTAINABILITY. **Pre-sustainability**. 2012. <http://www.pre-sustainability.com/simapro-lea-software>. Acesso em: 27 dez. 2012.
- PUETTMANN, M. E. et al. Cradle-to-gate life-cycle inventory of US wood products production: CORRIM phase I and phase II products. **Wood and Fiber Science**, 42, p.15-28, 2010.
- PUETTMANN, M. et al. Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Oriented Strandboard

Production from the Southeast. [S.l:s.n], 2012.

PUETTMANN, M.E.; WILSON, J.B. Glued laminated beams-Pacific Northwest and Southeast. Phase I final report. **Consortium for Research on Renewable Industrial Materials**. CORRIM, Inc. Seattle: University of Washington, 2004.

REBITZER et al. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v.30,p. 701–720, 2004.

REBOLLAR, M.; PÉREZ, R.; VIDAL, R. Comparison between oriented strand boards and other wood-based panels for the manufacture of furniture. **Materials Design**, v.28, p. 882–888, 2007.

REED, D. L. **Life-cycle assessment in government policy in the United States**. 2012.145 f. Tese (Doutorado)- Universidade de Tennessee, 2012.

REIS, M. G. F. et al. Sequestro e armazenamento de carbono em florestas nativas e plantadas dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQUESTRO DE CO<sub>2</sub>, 1., 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p.157-195.

REISSMANN, C. B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de Pinus. In: GONÇALVES, J.L.M., BENEDETTI, V. (Eds). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, p. 135-165, 2000.

REMMEN, A.; JENSEN, A.A.; FRYDENDAL, J. **Life cycle management—a business guide to sustainability**. United Nations Environment Programme, Paris, France, 2007.

RENZO, R. **Painel estrutural de lâminas paralelas de Eucalyptus grands utilizando adesivo resorcinólico, taninos e poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2008. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

RIBEIRO, P. H. **Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados**. 2009. 343f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

RICHTER, K.; GUGERLI, H. Wood and wood products in comparative life cycle assessment. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 54, p. 225–231, 1996.

RIVELA, B. et al. Life cycle inventory of particleboard:a case study in the wood sector. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11,n. 2, p.106-113, 2006.

RIVELA, B.; MOREIRA, M.T.; FEIJOO, G. Life-cycle inventory of medium density fiberboard. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, p. 143–150, 2007.

ROY, P. et al. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. **International Journal of Food Engineering**, v. 90, n. 1, p. 1-10, 2009.

SALAZAR, J.; SOWLATI, T. **Life cycle assessment of windows for the North American Resident Market**. University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2008.

SALDANHA, L. K. **Alternativas tecnológicas para produção de chapas de partículas orientadas “OSB”**. 2004. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

SALDANHA, L. K.; IWAKIRI, S. Influência da densidade e do tipo de resina nas propriedades tecnológicas de painéis OSB de *Pinus taeda* L. **Floresta**, v. 39, n. 3, p. 571-576, 2009.

SANTOS, A. F. et al. Importância Sócio Econômica e Ambiental. **Revista da Madeira**. v. 18, n. 107, p. 66-71, 2007.

SANTOS, M. F. N. **Análise dos Impactos na Construção Civil: Avaliação do ciclo de vida em Chapas de Partículas para forros**. 2010. 151f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2010.

SANTOS, M. F. N.; BATTISTELLE, R. A. G.; MANFRINATO, J. W. S. Panels with agroindustrial residue: life cycle assessment as an instrument in the evaluation of recycling. In: POMS 18th Annual Conference, 2007, Dallas. **Anais ...18 POMS**, 2007.

SANTOS, W. L. F et al. Particleboard manufactured from Tauari (*Couratari oblongifolia*) wood waste using castor oil based polyurethane resin. **Materials Research**, v. 17, n. 3, p. 657-663, 2014.

SARTORI, L. **Avaliação comparativa de desempenho ambiental de duas caixas de carga de semi-reboque bitrem graneleiro: compósito natural versus compósito sintético**. 2007. 193f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007.

SATHRE, R.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S. Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials. **Woodhead**, p. 311-337, 2014.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Determinação de regimes de desbaste para povoamentos de *Pinus elliottii* E. do planalto ocidental no estado de Santa Catarina. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p.43-59, 1994.

SCHULZE, E. et al. Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral. **Gcb Bioenergy**, v. 4, n. 6, p. 611-616, 2012.

SCOLFORO, J. R. S. et al. Simulação e avaliação econômica de regimes de desbastes e desrama para obter madeira de *Pinus taeda* livre de nós. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.11, n.1, p.121-139, 2001.

SEAN, T.; BRUNETTE, G.; CÔTE, F. Protection of Oriented Strandboard with borate. **Forest Product Journal**, v. 49, v.6, p.47-51, 1999.

SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. Life cycle assessment: management tool for decision-making. **Interfacehs**, v. 1, n. 1, 2006.

SHARAAI, A. H.; MAHMOOD, N. Z.; SULAIMAN, A. H. Life cycle impact assessment (LCIA) using the ecological scarcity (ecopoints) method: A potential impact analysis to potable water production. **African Journal of Biotechnology**, v.11, n.6, p.1391-1402, 2014.

SHENGYANGJX. 2016. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail-ing/totalmente-autom-tico-linha-pb-osb-linha-de-produ-o-linha-de-mdf-para-a-m-quina-de-madeira-1585228009.html> Linyi Lanshan Shengyang Wood-Based Panel Machinery Factory. Acesso: 04/01/2016.

SHERWANI, A. F. et al. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 540-544, 2010.

SHIMIZU, J. Características físicas, químicas e anatômicas da madeira de *Pinus merkusii*. **Comunicado Técnico EMBRAPA Florestas**, Colombo, n.65, p.1-4, 2001.

SILVA, D. A. L. **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. 2012. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, D. A. L. et al. Life cycle assessment of wood-based composites: state-of-the-art and opportunities for reducing environmental impacts. In: Rocco Lahr, F. A.; Savastano Junior, H.; Fiorelli, J. **Nonconventional Building Materials based on agro-industrial wastes**, Tiliform, 2015. Cap. 6. p.143-178, 2015.

SILVA, D. A. L. **Gestão do ciclo de vida de produtos por meio da avaliação e o monitoramento ambiental de processos de manufatura: procedimento e estudos de caso**. 2016. 317 f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SILVA, D.A.L. Do wood-based panels made with agro-industrial residues provide environmentally benign alternatives? An LCA case study of sugarcane bagasse addition to particleboard manufacturing. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 19, n. 10, p. 1767–1778, 2014.

SILVA, G. A.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida. In: VILELA JÚNIOR, A.; DEMAJOROVIC, J. **Modelos e ferramentas de gestão ambiental – desafios e perspectivas**, 2006.

SILVA, J. C. Preservantes: Madeira preservada e seus conceitos. *Revista da Madeira*, Curitiba, v. 1, n. 103, 2007. Disponível em: [http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=1061&subject=Preservantes&title=Madeira%20preservada%20e%20seus%20conceitos](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1061&subject=Preservantes&title=Madeira%20preservada%20e%20seus%20conceitos) . Acesso em: 27 dez. 2012.

SILVA, P. H. M.; ANGELI, A. **Implantação e manejo de florestas comerciais**. 2006. 18. ed. Piracicaba: Ipef- Instituto de Pesquisas Florestais, 2006.

SILVA, S. A. M. et al. Painéis de partículas de madeira leucena e resina poliuretana derivada de óleo de mamona. **Ciência Rural**, p. 1399-1404, 2013.

SIXEL, R. M. M. **Production of quality forests: soil preparation**. 2009. Disponível em: <<http://www.ipef.br/silvicultura/preparodesolo.asp>>. Acesso: 1 fev 2016.

SOUZA, A. M. et al. Mechanical Properties of OSB Wood Composites with Resin Derived from a Renewable Natural Resource. **International Journal of Composite Materials** (Online), v. 4, p. 157-161, 2014.

SOUZA, A. M. et al. Modulus of elasticity in static bending for oriented strand board (OSB). **International Journal of Composite Materials**, v.4, p.56-62, 2014.

SOUZA, A. M. **Produção e avaliação do desempenho de painéis de partículas orientadas (OSB) de Pinus sp. com inclusão de telas metálicas**. 2012. 116f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SOUZA, R. S. Evolução e condicionantes da gestão ambiental na empresa. **Revista Eletrônica de Administração**, v. 8, n. 6, p. 1-22, 2002.

SPIELMANN, M.; Bauer C, Tochschmid M. Transport service. **Ecoinvent report No. 14**. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf (Switzerland), 2007.

STAPE, J. L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil**. 2002. 237 f. Tese de Doutorado. Colorado State University, 2002.

SUASSUNA, J. **A cultura do Pinus: uma perspectiva e uma preocupação**. 1997. Fundação Joaquim Nabuco. Disponível em:< <http://www.fundaj.gov.br/docs/tropico/desat/pinus.html>>. Acesso em 25 jul. 2016.

SURDI, P. G. **Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) a partir da madeira de um híbrido de Pinus elliotii var. elliotii var. Pinus caribaea var. hondurensis**. 2012.102f. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SUZUKI, S.; TAKEDA, K. Production and properties of Japanese oriented strand board I: effect of strand length and orientation on strength properties of Sugi oriented strand board. **Japan Wood Science**, Tokyo, v. 46, p. 289 – 295, 2000.

TSUKAMOTO FILHO, A. A.; SILVA, M. L.; COUTO, L.; MÜLLER, M. D. Análise econômica de um plantio de Teca submetido a desbastes. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 4, p.487-494, 2003.

TAYLOR, J.; VAN LANGENBERG, K. Review of the environmental impact of wood compared with alternative products used in the production of furniture. **CSIRO Forestry and Forest Products Research and Development Corporation**, Victoria, 2003.

TECVERDE. **OSB**. 2016. Disponível em:< <http://www.tecverde.com.br//>>. Acesso em: 16 de jul. 2016.

TILLMAN, A. M.; BAUMANN, H. General description of life cycle assessment methodology. [S.l.]: Chalmers University of Technology. (Report 1995:5), 1995.

TOMASELLI, I. A indústria de painéis no Brasil e no mundo: tendências de mudanças do perfil de produção e usos. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1., 1998, Belo Horizonte. **Anais...Viçosa: SIF/ UFV/DEF**, p. 55 - 64.

UDO de HAES, et al. Best Available Practice Regarding Impact Categories and Category Indicators in Life Cycle Impact Assessment. **International Journal of LCA** , Vol. 4 (2), p. 66-74, 1999.

UGAYA, C. M. **Análise de ciclo de vida**: estudo de caso para materiais e componentes automotivos no Brasil. 2001. 221f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Campinas, 2001.

UNIÃO INTERNACIONAL PARA A CONSERVAÇÃO DA NATUREZA, PNUMA·Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, WWF-Fundo Mundial para a Natureza, Caring for the Earth - a strategy for sustainable living. Suíça, 1991.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME- UNEP. **Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases**: A basis for greener processes and products. Paris: United Nations Publication, 2012, 156 p.

VARANDA, L. D. et al. Evaluation of modulus of elasticity in static bending of particleboards manufactured with Eucalyptus grandis wood and oat hulls. **Acta Scientiarum**. Technology, Maringá, v. 36, p. 405- 411, 2014.

VARANDA, L. D. **Painéis de alta densidade para aplicação em pisos**: produção e avaliação de desempenho. 2016. 171f. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. D. Panorama de mercado: painéis de madeira. Panorama de mercado: painéis de madeira. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n.40, p. 323-384, 2014.

VOGEL, H. L. M. et al. Crescimento inicial de *Pinus taeda* L. relacionado a doses de N, P e K. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 2, p. 199-206, 2005.

WALKER, J.C.F. **Primary wood processing: principles and practice**. London: Chapman & Hall, 1993. p. 377-416, 1993.

WERNER, F. **Recycling of used wood**—inclusion of end-of-life options in LCA. In: Jungmeier G (ed), Life cycle assessment of forestry and forest products; achievements of COST Action E9 working group 3 'End of life: recycling, disposal and energy generation'. Joanneum, Institute of Energy Research, Graz, 6/1–24, 2001.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais. **Produção**, v. 23, n. 2, p. 436-447, 2013.

WILSON, J.B. Life-cycle inventory of medium density fiberboard in terms of resources, emissions, energy and carbon. **Wood Fiber Science**, v. 42, p. 107-124, 2010.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future**, Oxford University Press, United Kingdom, 1997.

XU, X. et al. Borate-treatment strand board from southern wood species: resistance against decay and mold fungi. **Bioresources**, v. 8, p.104-114, 2013.

YASUHARA, A.; KATAMI, T.; SHIBAMOTO, T. Formation of PCDDs, PCDFs, and Coplanar PCBs from Incineration of Various Woods in the Presence of Chlorides. **Environmental Science and Technology**, n 37, p. 1563–1567, 2003.

YASUHARA, A.; KATAMI, T.; SHIBAMOTO, T. Formation of PCDDs, PCDFs, and Coplanar PCBs from Incineration of Various Woods in the Presence of Chlorides. **Environmental Science and Technology**, n 37, p. 1563–1567, 2003.

ZOCHE, L. **Identificação das limitações da ACV sob a ótica de pesquisas acadêmicas**. 2014. 108f. Dissertação (mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014.

ZOCHE, L. et al. Review of patents on life cycle assessment. **African Journal of Agricultural Research**. v. 10, n. 8, p. 858–864, 2015.