

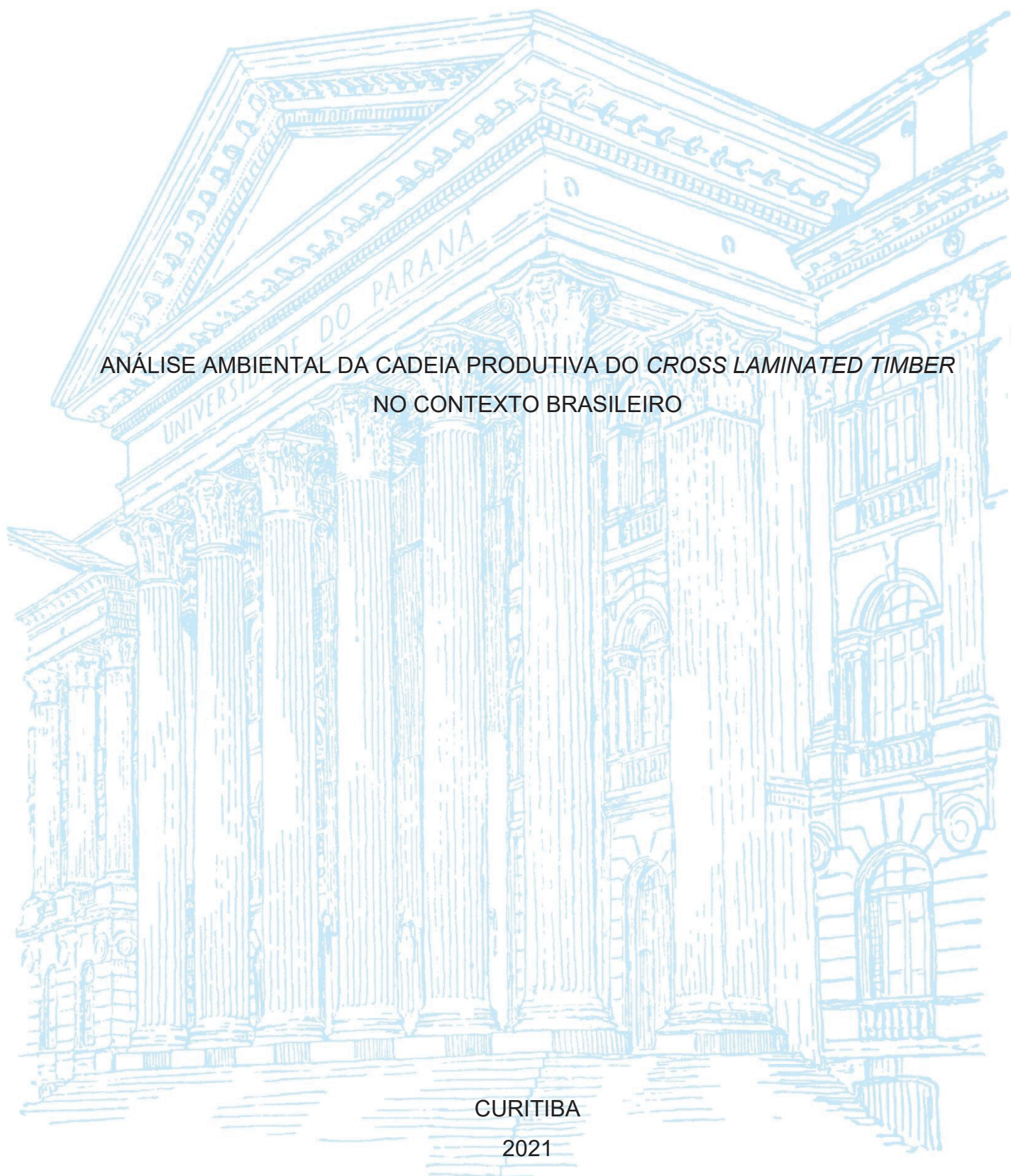
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAMILA YARA DOS SANTOS SANCHOTENE

ANÁLISE AMBIENTAL DA CADEIA PRODUTIVA DO *CROSS LAMINATED TIMBER*
NO CONTEXTO BRASILEIRO

CURITIBA

2021



CAMILA YARA DOS SANTOS SANCHOTENE

ANÁLISE AMBIENTAL DA CADEIA PRODUTIVA DO *CROSS LAMINATED TIMBER*
NO CONTEXTO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva.

Coorientadores: Prof.^a Dra. Kátia Garcia Punhagui e Prof. Dr. Thiago Campos Monteiro.

CURITIBA

2021

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Sanchotene, Camila Yara dos Santos

Análise ambiental da cadeia produtiva do Cross Laminated Timber no
contexto brasileiro / Camila Yara dos Santos Sanchotene. - Curitiba, 2021.
124 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva.

Coorientadores: Prof.^a Dra. Kátia Garcia Punhagui

Prof. Dr. Thiago Campos Monteiro.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências
Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba,
29/04/2022.

Área de concentração: Tecnologia e utilização de produtos florestais

1. Lâminas de madeira - Aspectos ambientais. 2. Lâminas de madeira - Brasil. 3.
Gases do efeito estufa. 4. Aquecimento global. 5. Ciclo de vida do produto. I. Silva,
Dimas Agostinho. II. Punhaqui, Kátia Garcia. III. Monteiro, Thiago Campos. IV.
Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD - 624.184

CDU - 634.0.832.2



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **CAMILA YARA DOS SANTOS SANCHOTENE** intitulada: **Análise ambiental da cadeia produtiva do *Cross Laminated Timber* no contexto brasileiro**, sob orientação do Prof. Dr. DIMAS AGOSTINHO DA SILVA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 29 de Abril de 2022.

Assinatura Eletrônica

02/05/2022 14:20:42.0

DIMAS AGOSTINHO DA SILVA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

04/05/2022 14:57:03.0

FABIANE SALLES FERRO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE)

Assinatura Eletrônica

03/05/2022 16:11:57.0

SÉRGIO FERNANDO TAVARES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico este trabalho à minha família, em especial ao meu marido Marco Sanchotene, pelo amor e compreensão durante o processo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e ao meu professor orientador Dr. Dimas Agostinho da Silva pela oportunidade de realização do mestrado, o qual me proporcionou grande aprendizado e crescimento profissional.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

Agradeço ao comitê de orientação composto por Dra. Kátia Garcia Punhagui e Dr. Thiago Campos Monteiro, pelo apoio e orientações.

Agradeço à Anna Cláudia Fischer, amiga e grande parceira de pesquisa.

Agradeço ao Laboratório de Energia de Biomassa e os pesquisadores que lá estavam e estão por me acolherem e tornarem uma boa parte do trabalho agradável.

Agradeço à toda equipe que desenvolveu o Inventário do Ciclo de Vida do Sistema Construtivo *Wood frame*, com quais muito aprendi: Dr. Sérgio Fernando Tavares, Dr. Dimas Agostinho da Silva, Dra. Kátia Garcia Punhagui, Ma. Anna Cláudia Fischer, Ma. Nathália Cardoso de Azevedo, Me. Eduardo Picoloto, Dr. Marcelo Langer e Dra. Janice Bernardo.

“Quanto ao futuro, não se trata de prever, mas de torná-lo possível. “
Antoine de Saint Exupéry, Cidadela, 1948

RESUMO

O *Cross Laminated Timber* (CLT) é um material constituído por lamelas de madeira em camadas coladas ortogonalmente com capacidade estrutural para substituir o concreto armado e o aço em determinados usos, além de conferir alto grau de industrialização a processos construtivos. O perfil ambiental deste produto tem despertado interesse da comunidade científica, mas ainda são escassos os estudos que analisam esta cadeia para realidade brasileira. O objetivo desta pesquisa foi realizar uma avaliação do ciclo de vida do berço-ao-portão da fabricação de painel com dados primários da produção brasileira de *Pinus spp.*, em termos de potencial de aquecimento global e consumo de recursos energéticos para unidade declarada de 1 m³ de CLT. Os resultados demonstraram que a etapa de fabricação do painel contribuiu com 45% das emissões de gases do efeito estufa, seguido pela produção de madeira serrada, com 34% das emissões. A etapa da produção da madeira serrada foi a de maior consumo energético devido aos processos de desdobro e secagem, porém, a energia renovável representou 97% deste consumo. Observou-se que o processo de colheita e o transporte de toras são pontos críticos na etapa processamento florestal devido ao consumo de combustíveis fósseis pelo maquinário florestal. O uso da biomassa para a produção de energia para serraria é apontado como potencial mitigador de emissões fósseis. O aumento da qualidade da madeira poderia ser um fator de melhoria ambiental, pois contribui para a redução de resíduos e o melhor aproveitamento dos recursos energéticos. O uso do painel CLT em edificações pode contribuir para a mitigação do aquecimento global, pois esta cadeia produtiva se caracteriza pelo uso de energia renovável além de promover o estoque de carbono.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. CLT. Madeira Lamelada Cruzada. Madeira Engenheirada. Madeira serrada. Serraria. Aquecimento Global. Consumo energético.

ABSTRACT

Cross Laminated Timber (CLT) is a material, made up of wooden lamellas in orthogonally glued layers, which has the structural capacity to replace reinforced concrete and steel in certain uses and also adds a high degree of industrialization to construction processes. The environmental profile of this product has gained the interest of the scientific community, but more studies analyzing its production chain are needed in the Brazilian reality. The goal of this research was to carry out an assessment of the cradle-to-gate life cycle of panel manufacturing with primary data from the Brazilian production of *Pinus spp.*, in terms of global warming potential and consumption of energy resources for a declared unit of 1 m³ of CLT. The results showed that the panel manufacturing step contributed with 45% of greenhouse gas emissions, followed by the production of sawn wood, with 34% of emissions. The sawn wood production stage was the one with the highest energy consumption due to the splitting and drying processes, however, renewable energy represented 97% of this consumption. It was observed that the harvesting process and the transport of logs are critical points in the forest processing stage due to the consumption of fossil fuels by the forest machinery. The use of biomass to produce energy for sawmills is pointed out as a potential mitigating factor for fossil emissions. The increase in wood quality could be a factor of environmental improvement, as it contributes to the reduction of waste and the better use of energy resources. The use of the CLT panel in buildings can contribute to the mitigation of global warming, as this production chain is characterized by the use of renewable energy in addition to promoting carbon stock.

Keywords: Life Cycle Assessment. CLT. *Cross Laminated Timber*. Engineered Wood. Lumber. Sawmill. Global Warming. Energy consumption.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CONFIGURAÇÃO DO CLT	25
FIGURA 2 - EXEMPLO DE SEÇÕES TRANSVERSAIS DO PAINEL CLT E DIREÇÃO DAS FIBRAS DAS CAMADAS SUPERIORES	26
FIGURA 3 - DESENVOLVIMENTO DO CROSS LAMINATED TIMBER NO MUNDO	27
FIGURA 4 - CRESCIMENTO DA CONSTRUÇÃO EM MADEIRA MASSIVA E A EMIÇÃO/ESTOQUE DE CARBONO DECORRENTE DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA AMÉRICA DO NORTE.....	30
FIGURA 5 EDIFICAÇÕES EM CROSS LAMINATED TIMBER CONSTRUÍDAS POR ANO NO BRASIL	33
FIGURA 6 EDIFICAÇÕES EM CLT POR USO E ANO NO BRASIL.....	34
FIGURA 7: ETAPAS DO MÉTODO <i>SYSTEMATIC SEARCH FLOW</i> (SSF)	42
FIGURA 8 - PROCESSAMENTO SISTEMÁTICO DE REVISÃO NA LITERATURA CIENTÍFICA.	44
FIGURA 9 – EVOLUÇÃO DE PUBLICAÇÕES SOBRE CLT/ACV NO PERÍODO DE 2000 A 2020	45
FIGURA 10 - FRONTEIRAS DOS ESTUDOS CLT/ACV	50
FIGURA 11 - UNIDADE FUNCIONAL DOS ESTUDOS CLT/ACV	52
FIGURA 12 - CATEGORIAS DE IMPACTO DOS ESTUDOS CLT/ACV	53
FIGURA 13 - ESTRUTURA METODOLÓGICA DA ACV	65
FIGURA 14 - FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE PRODUTO.....	67
FIGURA 15 - GERMINAÇÃO NO TUBETE E DESENVOLVIMENTO.....	69
FIGURA 16 – RUSTIFICAÇÃO E MUDAS PRONTAS PARA O TRANSPORTE.....	70
FIGURA 17 - PREPARAÇÃO DO SOLO E PLANTIO.....	70
FIGURA 18 - MANUTENÇÃO E DESBASTE.....	71
FIGURA 19 - CORTE RASO.....	71
FIGURA 20 - INÍCIO DO PROCESSAMENTO DAS TORAS	72
FIGURA 21 - DESDOBRIO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO	73
FIGURA 22 - CLASSIFICAÇÃO DAS PEÇAS.....	73
FIGURA 23 - PEÇAS TABICADAS PARA SEREM DESTINADAS À ESTUFA DE SECAGEM	74
FIGURA 24 - ESTUFA DE SECAGEM.....	74

FIGURA 25 - PEÇAS ORGANIZADAS EM FARDOS PARA EXPEDIÇÃO.....	75
FIGURA 26 - ENTRADA DE PEÇAS PARA TRATAMENTO NA AUTOCLAVE.....	76
FIGURA 27 - ESTUFA DE SECAGEM ABASTECIDA POR CALDEIRA	77
FIGURA 28 - PEÇAS TRATADAS E SECAS PRONTAS PARA EXPEDIÇÃO	77
FIGURA 29 - SELEÇÃO DE PEÇAS, UNIÃO FINGER JOINT E CORTE.....	78
FIGURA 30 - DISPOSIÇÃO DAS PEÇAS EM CAMADAS, COLAGEM E USINAGEM	79
FIGURA 31 - PAINEL PRONTO PARA EXPEDIÇÃO	79
FIGURA 32 - FLUXOGRAMA DO SUBSISTEMA OPERAÇÕES FLORESTAIS	90
FIGURA 33 - FLUXOGRAMA ICV PRODUÇÃO DE MUDAS	90
FIGURA 34 - FLUXOGRAMA ICV PLANTIO E MANUTENÇÃO DA FLORESTA.....	93
FIGURA 35 - FLUXOGRAMA ICV COLHEITA.....	96
FIGURA 36 - FLUXOGRAMA ICV PRODUÇÃO DA MADEIRA SERRADA.....	98
FIGURA 37 - FLUXOGRAMA ICV TRATAMENTO DA MADEIRA SERRADA.....	102
FIGURA 38 - FLUXOGRAMA ICV DA PRODUÇÃO DO CLT	106
FIGURA 39 - PORCENTAGEM DE EMISSÕES DE CO ₂ eq POR SUBSISTEMA...	110
FIGURA 40 - EMISSÕES DE CO ₂ eq. – PROCESSO E TRANSPORTE.....	112
FIGURA 41 - CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS POR SUBSISTEMA.	113
FIGURA 42 - CONSUMO ENERGÉTICO DO PROCESSO POR SUBSISTEMA: FÓSSIL X RENOVÁVEL	114
FIGURA 43 - CONSUMO ENERGÉTICO - PROCESSO X TRANSPORTE	114
FIGURA 44 - CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL DO PROCESSO: FÓSSIL X RENOVÁVEL	115

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - PRODUÇÃO DE CLT NA EUROPA 2016 - 2020	29
QUADRO 2 – SUBSISTEMAS, ICVs E SUAS DEFINIÇÕES.....	66
QUADRO 3 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A DEFINIÇÃO DAS FRONTEIRAS	68
QUADRO 4 - FATORES DE EMISSÃO DE CO ₂ , CH ₄ E N ₂ O POR QUEIMA DE BIOMASSA DE MADEIRA PARA ENERGIA NAS INDÚSTRIAS.	84
QUADRO 5 - FATORES DE EMISSÃO DE CO ₂ , CH ₄ E N ₂ O POR FONTES PRIMÁRIAS PARA A GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NO BRASIL EM 2019.....	85
QUADRO 6 - FATORES DE EMISSÃO DE CO ₂ , CH ₄ E N ₂ O POR COMBUSTÃO MÓVEL NAS INDÚSTRIAS.....	87
QUADRO 7 - FATORES MÉDIOS DE CONSUMO DE DIESEL E DE EMISSÃO DE POLUENTES POR CAMINHÕES NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO BRASILEIRO- FORNECIDOS PELO PROGRAMA DE CONTROLE DE EMISSÕES VEICULARES (PROCONVE) - FROTAS 2000-2012	87
QUADRO 8 - FATORES DE EMISSÃO DE CO ₂ , CH ₄ E N ₂ O PARA TRANSPORTE MARÍTIMO.	88
QUADRO 9 - ENTRADAS - PRODUÇÃO DE MUDAS	91
QUADRO 10 - DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE PRODUÇÃO DE MUDAS	92
QUADRO 11 - SAÍDAS - PRODUÇÃO DE MUDAS.....	92
QUADRO 12 - ENTRADAS - PLANTIO E MANUTENÇÃO DA FLORESTA	93
QUADRO 13 - DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE PLANTIO E MANUTENÇÃO DA FLORESTA.....	94
QUADRO 14 - SAÍDAS - PLANTIO E MANUTENÇÃO DA FLORESTA	95
QUADRO 15 - ENTRADAS - COLHEITA.....	96
QUADRO 16 - DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE - COLHEITA.....	97
QUADRO 17 - SAÍDAS - COLHEITA	97
QUADRO 18 - ENTRADAS - PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA SECA E APLAINADA.....	99
QUADRO 19 - DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE - PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA SECA E APLAINADA	99

QUADRO 20 - SAÍDAS - PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA SECA E APLAINADA	100
QUADRO 21 - BALANÇO DE MASSA.....	101
QUADRO 22 - ENTRADAS - TRATAMENTO DE MADEIRA SERRADA COM CCB - TMS	102
QUADRO 23 - DISTÂNCIAS MÉDIAS E MODAIS DE TRANSPORTE	103
QUADRO 24 - SAÍDAS - TRATAMENTO DE 1 TONELADA DE MADEIRA SERRADA COM CCB.....	104
QUADRO 25 - BALANÇO DE MASSA - TMS	105
QUADRO 26 - ENTRADAS – PRODUÇÃO DO CLT - PCLT	106
QUADRO 27 - DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE PCLT	107
QUADRO 28 - SAÍDAS - PRODUÇÃO DE 1 M ³ DE CLT – PCLT.....	108
QUADRO 29 - RESULTADOS AICV PARA 1M ³ DE CLT	109

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
TABELA 2 - ESTUDOS LEVANTADOS EM BUSCA NA BIBLIOTECA DIGITAL DE TESES E DISSERTAÇÕES BRASILEIRAS	34
TABELA 3: CRITÉRIOS DE SELEÇÃO PARA REVISÃO DE LITERATURA.....	43
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DOS ESTUDOS SELECIONADOS	46
TABELA 5: SEQUESTRO DE CARBONO PARA 1M ³ DE CLT.....	116

SUMÁRIO

1 CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	16
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	19
1.2 HIPÓTESE	19
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo Geral	19
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
1.5 REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO I.....	21
2 CAPÍTULO II: CROSS LAMINATED TIMBER - PRODUÇÃO E CONTEXTO	24
2.1 INTRODUÇÃO	24
2.2 MÉTODO.....	24
2.3 REVISÃO DE LITERATURA	25
2.3.1 Características do painel CLT	25
2.3.2 Desenvolvimento do CLT	26
2.3.3 Processo de fabricação do CLT	30
2.3.4 Matéria- prima e normatização.....	31
2.3.5 CLT no Brasil.....	33
2.3.6 Pesquisas desenvolvidas sobre o CLT no contexto Brasil	34
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
2.5 REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO II.....	38
3 CAPÍTULO III: REVISÃO SISTEMÁTICA DE ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CLT	41
3.1 INTRODUÇÃO	41
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.3 RESULTADOS DA REVISÃO E DISCUSSÃO.....	44
3.3.1 Características básicas dos estudos	44
3.3.2 FRONTEIRAS DOS ESTUDOS	50
3.3.3 UNIDADE FUNCIONAL.....	51
3.3.4 CATEGORIAS DE IMPACTO ANALISADAS	52
3.3.5 PRINCIPAIS LACUNAS CIENTÍFICAS APRESENTADAS PELOS ESTUDOS	
56	
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	58

3.5 REFERÊNCIAS CAPÍTULO III	59
4 CAPÍTULO IV: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CLT NO CONTEXTO	
BRASILEIRO	63
4.1 INTRODUÇÃO	63
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	64
4.2.1 OBJETIVO E ESCOPO	65
4.2.2 DEFINIÇÕES DE ESCOPO	65
4.2.3 DESCRIÇÃO DO PRODUTO	68
4.2.4 DESCRIÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA	69
4.2.4.1 Operações Florestais.....	69
4.2.4.2 Produção da Madeira Serrada.....	72
4.2.4.3 Tratamento da Madeira	75
4.2.4.4 Produção do CLT.....	78
4.2.5 PROCEDIMENTO DE COLETA.....	80
4.2.5.1 DADOS PRIMÁRIOS.....	80
4.2.5.2 DADOS SECUNDÁRIOS.....	81
4.2.6 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	81
4.2.6.1 Conversão dos fluxos de madeira em massa	82
4.2.6.2 Conversão de energia térmica proveniente de biomassa	83
4.2.6.3 Cálculo de emissões associadas à combustão	83
4.2.6.4 Avaliação do ciclo Vida – Cálculo do Potencial de Aquecimento Global	89
4.3 RESULTADOS	90
4.3.1 OPERAÇÕES FLORESTAIS	90
4.3.1.1 Produção de mudas.....	90
4.3.1.2 Plantio e Manutenção da Floresta	93
4.3.1.3 Colheita	95
4.3.2 PRODUÇÃO DA MADEIRA SERRADA	98
4.3.3 TRATAMENTO DA MADEIRA	101
4.3.4 PRODUÇÃO DO CLT.....	105
4.3.5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA – POTENCIAL DE	
AQUECIMENTO GLOBAL E CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS	109
4.4 DISCUSSÃO	109
4.4.1 CONTABILIZAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO	115
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	117

4.6 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	117
4.7 REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO IV	118
APÊNDICE 1 – MODELO QUESTIONÁRIO SIMPLIFICADO	124

1 CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

Existem evidências científicas de que o aquecimento do planeta em aproximadamente 1,0°C acima dos níveis pré-industriais é decorrente de ações antrópicas (*INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE* - IPCC, 2018). O Relatório especial sobre o aquecimento global (IPCC, 2018) prevê um aquecimento de 1,5°C entre 2030 e 2052 caso as metas de mitigação propostas no Acordo de Paris não sejam atendidas. Apenas com cortes agressivos nas emissões globais será possível manter o aumento da temperatura global em até 1,5°C, limite este, apontado pelos cientistas como o necessário para prevenir impactos climáticos catastróficos. Em um cenário menos promissor, o IPCC constata que o mundo pode aquecer até 5,7°C em 2100 – com resultados muito mais severos para o planeta. Entre as possíveis consequências do aquecimento global apontadas pelo IPCC (2018) estão: temperaturas extremas, risco de secas e déficits de precipitação, precipitações intensas, aumento do nível do mar, redução da biodiversidade e impactos sobre os ecossistemas, acidificação dos oceanos, aumento dos riscos relacionados ao clima para saúde, meios de subsistência, segurança alimentar, abastecimento de água e segurança humana.

Existe uma variedade de estratégias possíveis para que ocorra uma transição de uma sociedade movida a combustíveis fósseis e recursos não renováveis para uma sociedade mais sustentável, de energia baixo carbono e maior uso de recursos renováveis. Isso inclui edifícios de elevada eficiência energética e substituições de materiais e combustíveis por alternativas com menor pegada de carbono, cadeias produtivas de maior eficiência, tanto em suprimento de materiais e energia, como no gerenciamento pós-uso destes materiais (DODOO, GUSTAVSSON, SATHRE, 2014b). A indústria da construção civil é um setor de alto impacto ambiental considerando a sua contribuição em relação ao alto consumo energético e a depleção de recursos naturais (DODOO, GUSTAVSSON e SATHRE, 2014b; JONES *et al.*, 2016; MAIA DE SOUZA *et al.*, 2016; MONAHA e POWELL, 2011; SILVA *et al.*, 2013). O setor é responsável por aproximadamente 35% do consumo total de energia e 38% das emissões de CO₂ associadas ao consumo energético globais (*INTERNATIONAL ENERGY AGENCY*, 2019), por isso é um dos principais focos nos esforços em andamento para a mitigação das mudanças climáticas.

Para atender às demandas de mitigação do aquecimento global, um possível caminho é o sequestro e armazenamento de carbono promovidos pelas florestas, bem como, o uso da biomassa produzida por elas em substituição aos materiais de origem fóssil ou mineral (ALAM *et al.*, 2013). Lippke *et al.* (2011) alegam que o carbono sequestrado em produtos de madeira, complementam o carbono estocado em florestas, em um crescente armazenamento que só diminui no fim de vida útil dos produtos, quando o carbono volta para a biosfera pela deterioração do material. A aplicação da madeira para fins duráveis representa uma oportunidade para o sequestro de carbono e a consequente mitigação do aquecimento global (HUNG *et al.*, 2009; RAMAGE *et al.*, 2017). Contudo, aspectos do ciclo de vida como o manejo, a colheita e o uso de combustíveis fósseis e recursos energéticos, interferem no balanço de emissões oriundas destes processos em detrimento ao estoque por eles proporcionado (DOWAKI e MORI, 2005; PINGOUD *et al.*, 2010).

Os potenciais benefícios ambientais dos produtos florestais - como a madeira serrada e seus derivados engenheirados - têm provocado um aumento da demanda mundial por esses materiais e o consequente questionamento sobre a sustentabilidade e os encargos ambientais que decorrem da sua produção em massa (KLEIN *et al.*, 2015). Observa-se que a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem muito a contribuir para a análise desta cadeia, pois, sendo uma ferramenta metodológica de gestão ambiental, realiza um balanço de todas as fases do ciclo de vida, quantificando e analisando todas as interações e emissões decorrentes da produção (HAUSCHILD *et al.*, 2017). Devido à abordagem sistêmica e abrangente, diferentes atores do setor estão reconhecendo a importância da ACV no apoio à tomada de decisão estratégica (CABEZA *et al.*, 2014), pois, a mesma, fornece evidências científicas para a avaliação do perfil ambiental de produtos (BERGMAN e BOWE, 2008). Ainda que a madeira se diferencie positivamente em relação a seus produtos alternativos (BUCHANAN e LEVINE, 1999; MOLINA e CALIL, 2010; BERGMAN *et al.*, 2014; ARAÚJO *et al.*, 2016), esta cadeia produtiva deve ser continuamente avaliada e gerenciada com base em dados científicos gerados de forma normatizada.

Entre esses produtos de madeira, o *Cross Laminated Timber* (CLT) é uma das inovações construtivas mais recentes e se espalhou pela Europa e pelo mundo nas últimas duas décadas em uma ampla variedade de edifícios pelo mundo. O CLT é um composto quase rígido de madeira engenheirada que se caracteriza por uma elevada estabilidade dimensional devido à disposição ortogonal de suas peças, sendo capaz

de suportar grandes cargas e, por isso, adquiriu funções antes destinadas apenas ao aço e ao concreto armado (BRANDNER *et al.*, 2016). A inovação deste produto está nas grandes dimensões, em plano e espessura, tornando-o um elemento estrutural e autoportante muito versátil.

Liu *et al.* (2016) apontam que o uso do CLT em substituição a materiais convencionais contribuiria para uma redução de 30% do consumo energético e de 40% das emissões de CO₂. Lolli, Fufa e Wiik (2019), que comparam dois edifícios de energia quase zero, identificaram que o uso do CLT em substituição aos elementos de concreto estrutural pode produzir uma redução potencial de 6% das emissões de GEE. Moncaster *et al.* (2018) comparam o CLT com estruturas de concreto, aço e bloco estrutural e confirmam que o material de madeira engenheirada é o de menor impacto. Robertson, Lam e Cole (2012) também comparam o CLT com o concreto armado e relatam uma melhoria de pelo menos 14% na categoria de impacto de potencial de aquecimento global. Chiniforush, Akbarnezhad, Xiao (2019) fazem uma análise detalhada do ciclo de vida energético de dois tipos de laje: uma composição de aço e CLT e outra de aço e concreto. Estes autores indicam que a composição aço/CLT resultou em uma redução de 107,5% da energia incorporada e que os benefícios ambientais perpassam também questões como a reciclabilidade e capacidade de desconstrução do sistema. Dodoo, Gustavsson, Sathre (2014b) fazem uma análise do ciclo de vida energético comparativa entre três sistemas construtivos em madeira: CLT, viga/pilar e estrutura modular. Os autores sugerem que o sistema em CLT reduz entre 6-16% o uso de energia primária em relação a produção em relação aos outros sistemas. Dong *et al.* (2019) comparam o desempenho energético de edifício em CLT com um de concreto armado em uma região de frio severo na China e relatam que o sistema em CLT consome menos energia de aquecimento que o de concreto armado, em contrapartida, consome mais energia de refrigeração, indicando que pode ocorrer superaquecimento em edifícios com este sistema devido a sua massa térmica. Guo *et al.* (2020) também analisa comparativamente sistemas estruturais para regiões de frio severo na China, comparando o CLT com o concreto armado e um sistema de fardos de palha, e concluem que os materiais de base biológica são mais eficientes energeticamente que o concreto armado e representam um potencial de economia energética para essas regiões.

Até o momento da escrita desta pesquisa, com base nos levantamentos bibliográficos apresentados nesta dissertação, não se tem conhecimento do

desenvolvimento de um ICV da cadeia produtiva do CLT baseado em dados primários da produção de Pinus no Brasil. Logo, este trabalho, se justifica principalmente por esta contribuição e visa incentivar o desenvolvimento de bancos de dados regionais, bem como o uso da ACV como ferramenta de análise e gestão ambiental de produtos relacionados à construção civil. O objetivo desta pesquisa foi a Avaliação do Ciclo de Vida da cadeia produtiva do CLT no Brasil a partir da análise e quantificação dos impactos de aquecimento global e consumo de recursos energéticos.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Esta pesquisa visa responder à questão: Sob a perspectiva da ACV, qual seria o potencial de aquecimento global e consumo energético da produção do painel CLT no contexto brasileiro?

1.2 HIPÓTESE

O uso do painel CLT pode contribuir para redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) e o consumo energético associados ao setor de construção civil no Brasil.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Realizar a análise dos impactos de potencial de aquecimento global e consumo energético da cadeia produtiva do *Cross Laminated Timber* (CLT) no Brasil a partir do método da ACV.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Construir o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) da produção do CLT a partir de dados primários coletados no Brasil;
- Analisar e descrever a produção do CLT;
- Quantificar o potencial de aquecimento global e consumo energético da cadeia produtiva do CLT no contexto brasileiro.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi dividida em quatro capítulos e para a elaboração de cada um deles adotou-se determinada metodologia a ser melhor detalhada posteriormente. Apresenta-se aqui uma explicação geral e simplificada dos métodos utilizados em cada capítulo. A estrutura deste trabalho é apresentada resumidamente da Tabela 1.

TABELA 1: ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

CAPÍTULO	TÍTULO	CONTEÚDO
1	INTRODUÇÃO	Introdução geral.
2	<i>CROSS LAMINATED TIMBER</i> : PRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	Apresentação do material construtivo CLT, seu contexto e produção.
3	REVISÃO SISTEMÁTICA DE ESTUDOS DE ACV DO CLT	Revisão sistemática de estudos de ACV do CLT.
4	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CLT	ACV do CLT com a análise do seu perfil ambiental em termos de consumo energético e potencial de aquecimento global para o contexto brasileiro.

FONTE: Autora (2021).

Para a contextualização teórica e conhecimento sobre o CLT e sua produção, apresentados nos capítulos 1 e 2, adotou-se a revisão de literatura do tipo narrativa, na qual não há critérios explícitos e sistemáticos abordados nas estratégias de busca e utiliza-se de uma abordagem mais qualitativa. No capítulo 3, onde se realiza uma bibliometria dos estudos de ACV aplicados à cadeia produtiva do CLT, realizou-se uma revisão de literatura do tipo sistemática, a fim de abranger o maior número de artigos científicos que abordassem o tema.

No capítulo 4, onde o objetivo principal da pesquisa é alcançado, realiza-se uma ACV com base nas normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2006a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2006b). O protocolo de pesquisa envolve as ações: contato com a empresa e estabelecimento de parceria; conhecimento detalhado do processo produtivo e coleta de dados qualitativos; desenvolvimento do instrumento de coleta de dados; envio/aplicação do instrumento de coleta de dados; tratamento de dados; cálculo de emissões; balanços de massa; análise dos resultados e cálculo do potencial impacto de aquecimento global e consumo energético.

1.5 REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO I

ALAM, A.; KELLOMAKI, S.; KILPELAINEN, A.; STRANDMAN, H. Effects of stump extraction on the carbon sequestration in Norway spruce forest ecosystems under varying thinning regimes with implications for fossil fuel substitution. **GLOBAL CHANGE BIOLOGY BIOENERGY**, v. 5, n. 4, p. 445–458, 2013

ARAÚJO V. A.; CORTEZ-BARBOSA J.; GARCIA J.N.; GAVA M.; LAROCA C.; CÉSAR S. F. Woodframe: light framing houses for developing countries. **Rev. de la construcción** 15 78-87. 2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

BERGMAN, R. D.; BOWE, S. A. Environmental impact of producing hardwood lumber using life-cycle inventory. **Wood and Fiber Science**, v. 40, n. 3, p. 448–458, 2008.

BERGMAN, Richard *et al.* The carbon impacts of wood products. **Forest Products Journal**, USA, v. 64, n. 7, p.320-332, out. 2014.

BRANDNER, R.; FLATSCHER G.; RINGHOFER, A. SCHICKHOFER, G. THIEL, A. *Cross Laminated Timber (CLT): overview and development*. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 3, 2016, p. 331–351.

BUCHANAN, A. H.; LEVINE, S. B. Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. **Environmental Science and Policy**, n. 2, p. 427-437. 1999.

CABEZA, L. F.; RINCÓN, L.; VILARIÑO, V.; PÉREZ, G.; CASTELL, A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2014.

CHINIFORUSH, A. A.; AKBARNEZHAD, A.; VALIPOUR, H.; XIAO, J. Energy implications of using steel-timber composite (STC) elements in buildings. **Energy and Buildings**. 2018.

DODOO, A.; GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Lifecycle carbon implications of conventional and low-energy multi-storey timber building systems. **Energy and Buildings**. 2014a.

DODOO, A.; GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Lifecycle primary energy analysis of low-energy timber building systems for multi-storey residential buildings. **Energy and Buildings**. 2014b.

DONG, Y.; CUI, X.; YIN, X.; CHEN, Y.; GUO, H. Assessment of Energy Saving Potential by Replacing Conventional Materials by *Cross Laminated Timber (CLT)*-A Case Study of Office Buildings in China. **Applied Sciences**. 2019.

DOWAKI K.; MORI S. Biomass energy used in a sawmill. *Appl Energy*, 2005. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.04.006>

Glob. Alliance Build. Constr. (GlobalABC), Int. Energy Agency (IEA). 2019. **2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-Emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. Paris: UN Environ. Progr

GUO, H.; ZHOU, S.; QIN, T.; HUANG, L.; SONG, W.; YIN, X. Energy Sustainability of Bio-Based Building Materials in the Cold and Severe Cold Regions of China - A Case Study of Residential Buildings. **Applied Sciences**. 2020.

HAFNER, A.; SCHÄFER, S. Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 630–642, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://10.0.3.248/j.jclepro.2017.08.203>>.

HAFNER, A.; RÜTER, S. Method for assessing the national implications for environmental impacts from timber buildings – an exemplary study for residential buildings in Germany. **Wood and Fiber Science**, v. 50, p. 139-154, 2018. Disponível em: < <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/2682/2514>>.

HAUSCHILD, M. Z. Life cycle assessment handbook--a guide for environmentally sustainable products by Mary Ann Curran (ed), ISBN: 978-1-118-09972-8, 640 pp, 2012. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 6, p. 1367–1369, 2014. Dordrecht: Springer Science & Business Media. Disponível em: <<https://search.proquest.com/docview/1531582578?accountid=146694>>.

HUNG C.P.; WEI C.; WANG S.Y.; LIN F.C. The study on the carbon dioxide sequestration by applying wooden structure on eco-technological and leisure facilities. **Renew Energy**, 2009.

IDDON, C. R.; FIRTH, S. K. Embodied and operational energy for new-build housing: A case study of construction methods in the UK. **Energy & Buildings**, v. 67, p. 479–488, 2013. Disponível em: <<http://10.0.3.248/j.enbuild.2013.08.041>>.

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: **Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.

JONES, K.; STEGEMANN, J.; SYKES, J.; WINSLOW, P. Adoption of unconventional approaches in construction: The case of cross-laminated timber. **Constr. Build. Mater.** 2016, 125, 690–702.

KLEIN, D.; WOLF, C.; SCHULZ, C.; WEBER-BLASCHKE, G. 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. 20, n. 4, p. 556–575, 2015

LIPPKE, B.; ONEIL, E.; HARRISON, R.; *et al.* Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: Knowns and unknowns. **Carbon Management**, 2011.

LIU, Y.; GUO, H.; SUN, C.; CHANG, W. Assessing *Cross Laminated Timber* (CLT) as an Alternative Material for Mid-Rise Residential Buildings in Cold Regions in China—A Life-Cycle Assessment Approach. **Sustainability**. 2016.

LOLLI, N.; FUFA, S. M.; WIJK, M. K. An assessment of greenhouse gas emissions from CLT and glulam in two residential nearly zero energy buildings. **Wood Material Science & Engineering**. 2019.

MAIA DE SOUZA, D.; LAFONTAINE, M.; CHARRON-DOUCET, F.; *et al.* Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. **Journal of Cleaner Production**, 2016

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira. **Exact and Technological Sciences**. Londrina, p. 143-156. dez. 2010

MONAHAN, J.; POWELL, J.C. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. **Energy Build**. 2011, 43, 179–188.

MONCASTER, A. M.; POMPONI, F.; SYMONS, K. E.; GUTHRIE, P. M. Why method matters: temporal, spatial and physical variations in LCA and their impact on choice of structural system. **Energy and Buildings**. 2018.

PINGOUD, Kim *et al.* Assessing the integrated climatic impacts of forestry and wood products. **Silva Fennica**, v. 44, n. 1, p. 155-175, 2010.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; *et al.* The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017.

ROBERTSON, A. B.; LAM, F. C. F.; COLE, R. J. A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: laminated timber or reinforced concrete. **Buildings**. 2012

SILVA, P.C.; ALMEIDA, M.; BRAGANÇA, L.; MESQUITA, V. Development of prefabricated retrofit module towards nearly zero energy buildings. **Energy Build**. 2013, 56, 115–125.

2 CAPÍTULO II: CROSS LAMINATED TIMBER - PRODUÇÃO E CONTEXTO

2.1 INTRODUÇÃO

O produto e tecnologia foco deste trabalho encontra-se atrelado ao recente desenvolvimento do setor da construção civil aos conceitos de pré-fabricação e fabricação digital e à demanda de redução dos impactos ambientais decorrentes do setor. O uso da madeira na construção civil, como alternativa ao uso de materiais de origem mineral e fóssil, pode contribuir para melhoria do perfil ambiental desta indústria por possuir as reconhecidas características de renovabilidade e capacidade de sequestrar carbono ao longo do seu ciclo de vida (RAMAGE *et al.*, 2017). O painel CLT surge como um material, que por meio do uso da tecnologia, permite que a madeira adquira funções antes só destinadas ao concreto armado e ao aço.

A recente inserção deste material no cenário mundial e brasileiro, levanta dúvidas a respeito do desempenho ambiental deste material. Com o objetivo de embasar os conteúdos a serem apresentados no decorrer deste trabalho, o presente capítulo propõe descrever o material, seu surgimento e pesquisas desenvolvidas, o processo de fabricação, e o que as pesquisas nacionais mais relevantes estão demonstrando em relação à esta tecnologia aplicada ao contexto brasileiro.

2.2 MÉTODO

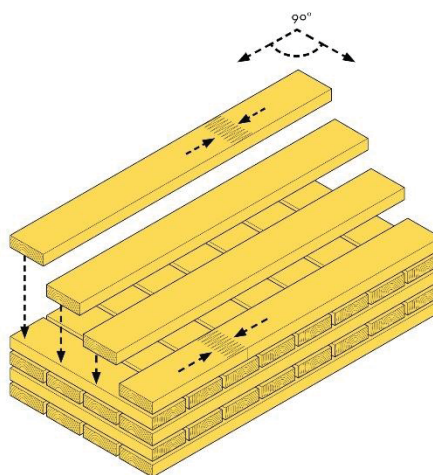
Para a contextualização teórica e conhecimento do painel CLT, adotou-se como método para o desenvolvimento deste capítulo, a revisão de literatura do tipo narrativa, não fazendo uso de critérios explícitos e sistemáticos nas estratégias de busca de trabalhos científicos. A revisão de literatura apresentada neste capítulo está dividida nos seguintes tópicos: Características do painel CLT; Desenvolvimento do CLT; Processo de fabricação do CLT; Matéria-prima e normatização; CLT no Brasil; Pesquisas desenvolvidas sobre o CLT no contexto brasileiro; e Considerações finais.

2.3 REVISÃO DE LITERATURA

2.3.1 Características do painel CLT

O CLT é um composto quase rígido de madeira engenheirada que se caracteriza por uma elevada estabilidade dimensional devido à disposição ortogonal de suas peças, sendo capaz de suportar cargas perpendiculares e laterais ao plano. A inovação deste produto está nas grandes dimensões, em plano e espessura, tornando-o um elemento estrutural e autoportante muito versátil. Os painéis CLT são constituídos por várias camadas de lamelas de madeira empilhadas transversalmente, geralmente a 90 graus e unidas por um adesivo estrutural. É comum os painéis terem de 18-30 metros de comprimento e de 3 a 4,8 metros de largura (BRANDNER *et al.*, 2016). A configuração das lâminas estruturais encontra-se demonstrada na FIGURA 1.

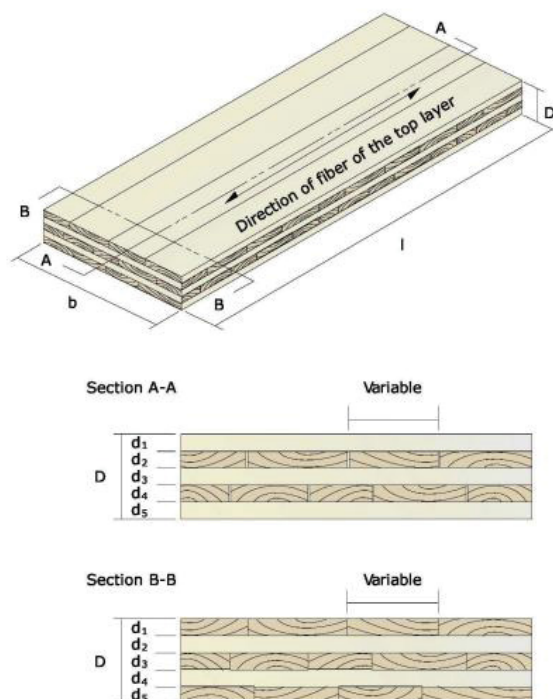
FIGURA 1 - CONFIGURAÇÃO DO CLT



FONTE: Waugh Thistleton Architects (2018)

A seção transversal possui pelo menos três camadas coladas e o painel é geralmente fabricado contendo um número ímpar, sendo comum de três a sete camadas. Estas camadas são constituídas por peças de espessura entre 12 e 45 milímetros. Segundo a EN 16351 (2015), a largura da peça deve ter entre 40 e 300 milímetros. A FIGURA 2 demonstra a relação entre as camadas e a direção das fibras.

FIGURA 2 - EXEMPLO DE SEÇÕES TRANSVERSAIS DO PAINEL CLT E DIREÇÃO DAS FIBRAS DAS CAMADAS SUPERIORES



FONTE: Karacabeyli e Douglas (2013).

As peças de madeira são feitas comumente de madeira proveniente de coníferas, mas também podem ser feitas a partir de folhosas (BRANDNER *et al.*, 2016). Segundo Brandner *et al.* (2016) é possível substituir camadas de peças de madeira sólida por outros produtos de madeira engenheirada, como o *Laminated Veneer Lumber* (LVL) ou o *Oriented Strand Board* (OSB).

2.3.2 Desenvolvimento do CLT

A primeira patente que se teve notícia referente à origem do CLT data de 1923, registrada em nome de Frank J. Walsel e Robert L. Watts nos Estados Unidos (WALSEL e WATTS, 1923). Neste documento, os autores chamam seu produto de *Composite Lumber* e descrevem a tecnologia que só teve desenvolvimento e aplicação no final do século XX.

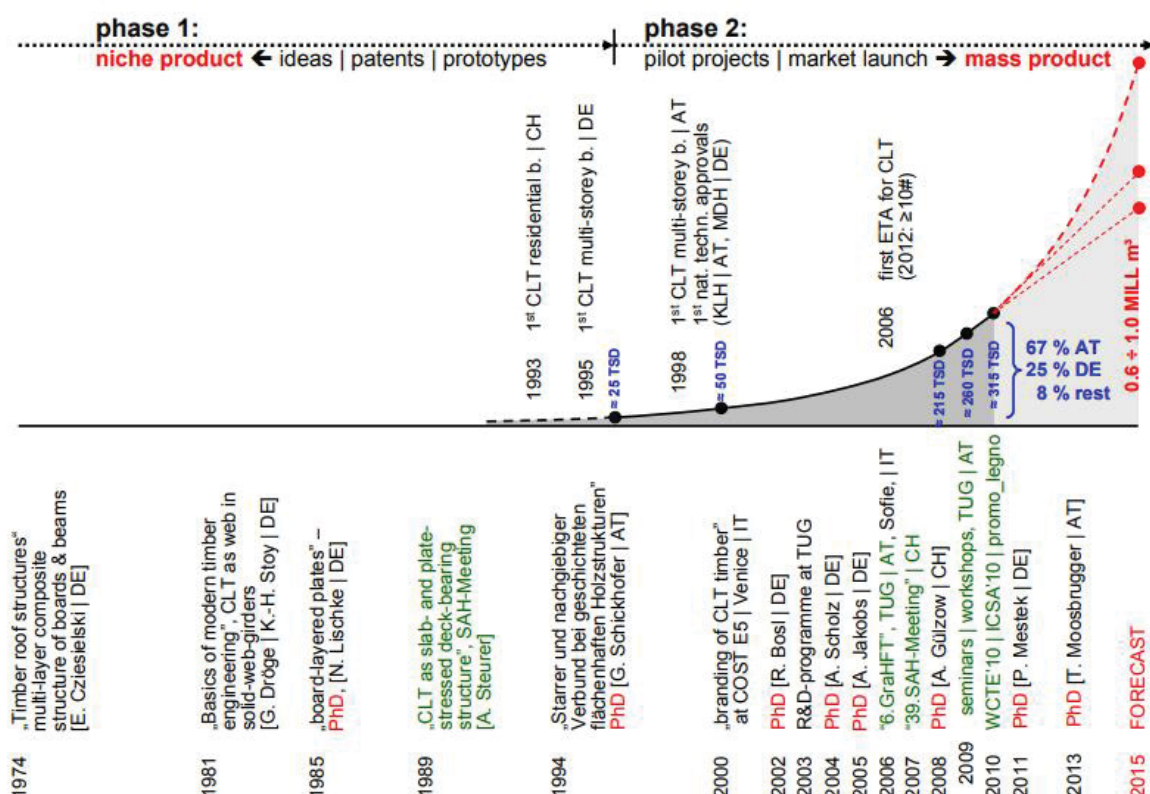
No início dos anos 1990, o CLT foi desenvolvido na Europa Central, particularmente na Áustria e na Suíça. Pesquisas que visavam ao melhor aproveitamento das camadas mais externas da tora levaram à criação de um produto laminado com as placas orientadas para maior estabilidade dimensional que, depois,

com o maior desenvolvimento das pesquisas, originou o CLT como é conhecido atualmente (HARRIS, 2015).

O produto foi desenvolvido nas décadas de 1970 e 1980 e demorou cerca de 20 anos até que as primeiras aprovações técnicas fossem feitas, o que ocorreu em 1998. A partir disso, foram 10 anos de pesquisa e desenvolvimento do produto para seu estabelecimento no mercado. Desde 2010, o foco das pesquisas é a disseminação e padronização, com ênfase no desenvolvimento de técnicas de construção (BRANDNER *et al.*, 2016).

Brandner (2013) apresenta o gráfico do desenvolvimento do CLT proposto por Schickhofer (2010) observado na FIGURA 3. Schickhofer (2010) divide o processo em duas fases: a primeira fase denominada de *niche product* e a segunda, *mass product*.

FIGURA 3 - DESENVOLVIMENTO DO CROSS LAMINATED TIMBER NO MUNDO



FONTE: Schickhofer (2010) *apud* Brandner (2013).

A primeira fase, entre os anos 1970 e 1990, foi o período em que as primeiras ideias e pesquisas surgiram e foram desenvolvidas. O autor destaca neste período o trabalho de Cziesielski (1974) que pesquisou estruturas de madeira para telhado

utilizando o que ele chamou de *multi-layer composite structure of boards & beams* (estrutura composta por várias camadas de tábuas e vigas). Também cita Dröge e Stay (1981), que utilizaram pela primeira vez o termo alemão *Brettsper Holz* (que veio a ser traduzido para o inglês como *Cross Laminated Timber*) para designar o CLT utilizado como uma trama de vigas sólidas. Cita também Lischke (1985) que em seu trabalho descreve produtos laminados de madeira, Steurer (1989) cujo trabalho avaliou o uso do CLT em pontes de madeira, e por último, a tese de (1994) que abordou a rigidez e flexibilidade de compostos estruturais laminados. Durante este período, também foram construídas a primeira residência (1993) e a primeira edificação (1995) com mais de um pavimento em CLT.

A segunda fase de desenvolvimento do CLT se inicia nos anos 90 com a construção dos primeiros edifícios e a consolidação do material no mercado. Em paralelo com o aumento do número de pesquisas, ocorre também o início da normatização do produto e o aumento significativo da produção.

Neste período se destacam as teses sobre estruturas em CLT como Bosl (2002), cujo trabalho lidou com o CLT exposto a cargas no plano; Scholz (2004), que trabalhou com estruturas espaciais em madeira; Jakobs (2005), cujo trabalho se concentrou nas cargas fora do plano, cisalhamento e torção; Guëlzow (2008), cuja tese aborda o módulo de elasticidade e cisalhamento do CLT; Mestek (2011), que disserta sobre elementos em CLT e esforços de cisalhamento; e, Flaig (2013), que trabalhou especificamente com vigas de CLT, entre outros trabalhos (BRANDNER *et al.*, 2016).

O gráfico de Schickhofer (2010) demonstra que o CLT se consolidou no mercado com o início da produção em grande escala e as estimativas atuais indicam que a produção do CLT deve continuar crescente (HARRIS, 2015).

Segundo Passareli (2013), o continente europeu responde por 63% da produção mundial de CLT e o uso deste material encontra-se consolidado neste continente. Ebsner (2017) previu que em 2020 a produção do CLT na Europa dobraria em relação à produção de 2016. O autor fez um levantamento dos principais produtores de CLT no continente europeu e suas respectivas produções em m³. A partir de uma taxa de crescimento de mercado estimada em 15% e considerada realista por *insiders* da indústria, o autor calculou uma demanda de 1,2 milhão de m³ em 2020. O QUADRO 1 apresenta o levantamento realizado por Ebsner (2017).

QUADRO 1 - PRODUÇÃO DE CLT NA EUROPA 2016 - 2020

EMPRESA	LOCALIZAÇÃO	PRODUÇÃO m³ 2016	POTENCIAL m³ 2020	OBS.
Binderholz	Áustria e Alemanha	145.000	210.000	-
Stora Enso	Áustria	130.000	210.000	Incluído 75.000 m³ para terceiro local de produção na Suécia
Legal & General	Reino Unido	-	120.000	Irão receber prensa para elementos de 6 m de altura
KLH Massivholz	Áustria	88.000	110.000	Nova prensa levada em consideração
Pfeifer Holz	Alemanha	-	100.000	Em operação total em 2019
Hasslacher Norica Timber	Áustria	40.000	80.000	Incluída segunda prensa
Mayr-Melnhof Holz	Áustria	60.000	80.000	-
CLT Finland	Finlândia	5.000	40.000	Operação total com maquinário atual. Após expansão 70.000 m³.
Eugen Decker	Alemanha	25.000	30.000	-
Züblin Timber	Alemanha	30.000	30.000	-
Lignotrend	Alemanha	25.000	25.000	-
Cross Timber Systems	Letônia	-	25.000	-
X-Lam Dolomiti	Itália	20.000	23.000	-
Weinberger Holz	Áustria	5.500	20.000	Sem CLT convencional
Martinsons	Suécia	-	20.000	-
W. u. J. Derix	Alemanha	12500	15000	-
Schilliger Holz	Suíça	13000	13000	-
TOTAL*		599.000	1.151.000	-
TOTAL**		680.000	1.250.000	-

* Produção Total; ** Total de dados/estimativas fornecidos pela empresa mais estimativa de produções conhecidas não cotadas com menos de 10.000 m³ de produção anual.

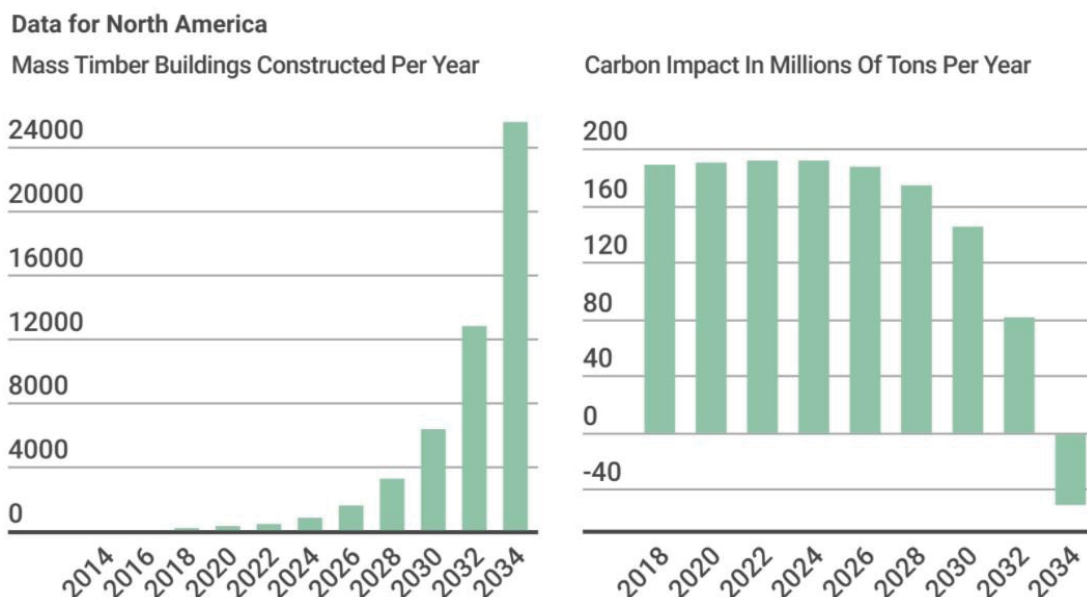
FONTE: Ebsner (2017) adaptado pela autora.

O CLT encontra-se em fase de implementação na América do Norte e já é uma alternativa viável entre os sistemas construtivos em madeira utilizados (KARACABEYLI e DOUGLAS, 2013). Frente ao crescente interesse do setor da construção civil, Brandner *et al.* (2016) previram o aumento significativo da produção nos Estados Unidos e Canadá. Segundo Caulfield (2020), no ano de 2019, foram construídos 78 edifícios em madeira massiva nos Estados Unidos.

Um abrangente relatório foi lançado em 2020 pela *Forest Business Network* intitulado *North American Mass Timber: State of the Industry*. Este relatório prevê que o número de edifícios construídos com madeira massiva tende a dobrar a cada dois anos na América do Norte. A *Forest Business Network* prevê que em 2034 supostamente haverá uma demanda por 1,2 bilhão de metros quadrados de madeira serrada para abastecer a indústria da construção em madeira massiva. Caso a expansão do mercado acompanhe a previsão, em 2034 a indústria da construção civil

norte-americana irá armazenar mais carbono do que emitir, conforme é apresentado na FIGURA 4.

FIGURA 4 - CRESCIMENTO DA CONSTRUÇÃO EM MADEIRA MASSIVA E A EMISSÃO/ESTOQUE DE CARBONO DECORRENTE DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA AMÉRICA DO NORTE



FONTE: Forest Business Network (2020)

2.3.3 Processo de fabricação do CLT

O processo de fabricação do CLT envolve tipicamente as seguintes etapas: seleção da madeira; agrupamento e aplainamento da madeira; aplicação de adesivo; colocação e prensagem de painel; corte de produto; usinagem de superfície; marcação e embalagem (KARACABEYLI e DOUGLAS, 2013). Karacabeyli e Douglas (2013) reforçam que para o bom desempenho do produto é muito importante a seleção da matéria-prima de qualidade, bem como o controle rigoroso dos parâmetros de aplicação do adesivo. Também devem ser realizados testes de controle de qualidade na fábrica para garantir as propriedades desejadas no produto.

As peças selecionadas devem estar secas e possuir teor de umidade de aproximadamente 12%, adequado para a melhor aderência, evitando defeitos como fendas e variações dimensionais. Primeiramente, é realizada uma minuciosa classificação visual para detecção de defeitos (ex.: nós soltos, desvios, entre outros), os quais devem ser removidos para garantir a qualidade do painel CLT a ser

produzido. Brandner *et al.* (2016) recomenda as seguintes classes de resistência¹: C24 para disposições homogêneas; C24 para camadas longitudinais; e C16/C18 para camadas transversais.

As peças são unidas por colagem de topo com *finger joints*, cujo comprimento varia de 15 a 20 milímetros, e adesivos como a Melamina-Ureia-Formol (MUF), o Poliuretano Monocomponente (PUR) e o Emulsificante Polímero-Isocianato (EPI). Todo o processo de montagem do painel CLT pode levar de 15 a 60 minutos, a depender do adesivo e equipamentos disponíveis (BRANDNER, 2013). As lâminas são montadas com a colocação das peças lado-a-lado até atingir o tamanho desejado. As camadas de lâminas são sobrepostas perpendicularmente umas às outras e são pulverizadas por adesivo.

Após a montagem e aplicação do adesivo das faces e bordas, ocorre a prensagem do painel, podendo ser realizada por prensa hidráulica, a vácuo ou por pressão de parafusos e grampos. A pressão da prensa pode variar em função do tipo de adesivo, espécie da madeira, geometria dos aderentes em relação à rugosidade da superfície e tolerâncias permitidas em espessura, sistema de aplicação do adesivo e quantidade de adesivo. A linha de cola deve ser menor ou igual a 0,1 milímetro (BRANDNER *et al.*, 2016).

Feita a prensagem, ocorre a etapa de acabamento do painel, com o aplainamento e o esquadrejamento. Podem ainda ser aplicados diferentes acabamentos sobre o painel como gesso, OSB ou placas cimentícias. Depois realizam-se cortes, encaixes e usinagens no CLT com roteadores *Computer Numeric Control* (CNC) que permitem alta precisão.

2.3.4 Matéria- prima e normatização

As espécies de madeira tipicamente usadas para produção do CLT na América do Norte e Europa são originadas de coníferas como o *Spruce*, *Douglas Fir*, *Western Larch* e *Pine* (WAUGH THISTLETON ARCHITECTS, 2018). Atualmente, na Europa, se usa principalmente o abeto da Noruega (*Picea abies*) na produção de peças para o painel. É possível também, usar madeira proveniente de folhosas, desde

¹ Classe de Resistência é o conjunto de classes de qualidade, decorrentes de sistemas de classificação (visual ou mecânica) de madeiras para estruturas, representando para fins de dimensionamento as mesmas propriedades físicas e mecânicas (EN 338).

que a aplicação se dê de forma adequada (BRANDNER *et al.*, 2016). É possível a utilização de espécies locais devido à composição do painel e a consequente homogeneização das propriedades da madeira.

No continente europeu, a primeira norma que regulamentou a produção do CLT foi a EN 16351 publicada em 2015. Esta norma estabelece os requisitos para a fabricação e as características de desempenho dos painéis. Segundo a EN 16351, os painéis devem ter ao menos três camadas ortogonais e as espessuras podem variar entre 6 e 45 mm. As peças sólidas das camadas podem ser coladas lateralmente ou não, e caso não sejam, o espaço entre as peças deve ser de no máximo 6 mm e sua largura não deve exceder 300 mm (EN, 2015).

Na Europa, a *Eurocode 5* normatiza os projetos estruturais em madeira para edificações em diferentes materiais lenhosos como a madeira maciça, a madeira laminada colada, e outros materiais, como o LVL e o CLT (EN 1995, 2004).

Na América do Norte, a norma que regulamenta a produção do CLT é a norma americana ANSI/APA PRG 320 (2017). Esta norma define o CLT como um painel de madeira engenheirada constituído de pelo menos três camadas de madeira serrada maciça unidas por um adesivo estrutural, sendo que a espessura de uma camada deve ser de no mínimo 16 mm e no máximo de 51 mm. Esta norma aprova o uso de qualquer espécie de conífera reconhecida pelo *American Lumber Standards Committee* (ALSC) ou pelo *Canadian Lumber Standards Accreditation Board* (CLSAB), porém, na composição de uma camada, esta deve conter a mesma espécie de madeira. Assim como Brandner *et al.* (2016), a norma também afirma que um painel pode conter camadas de diferentes espécies (ANSI/APA PRG 320, 2017).

No Brasil, ainda não há normas específicas para a produção do CLT e recomenda-se o uso da norma europeia ou americana para a produção nacional. A legislação de referência para edificações em madeira é a NBR 7190 (1997), sobre projetos estruturais em madeira e a NBR 15575 (2013), sobre a vida útil de desempenho das edificações. A NBR 7190 (1997) encontra-se em revisão e prevê a inclusão de estruturas em madeira engenheirada, entre elas, as estruturas em CLT.

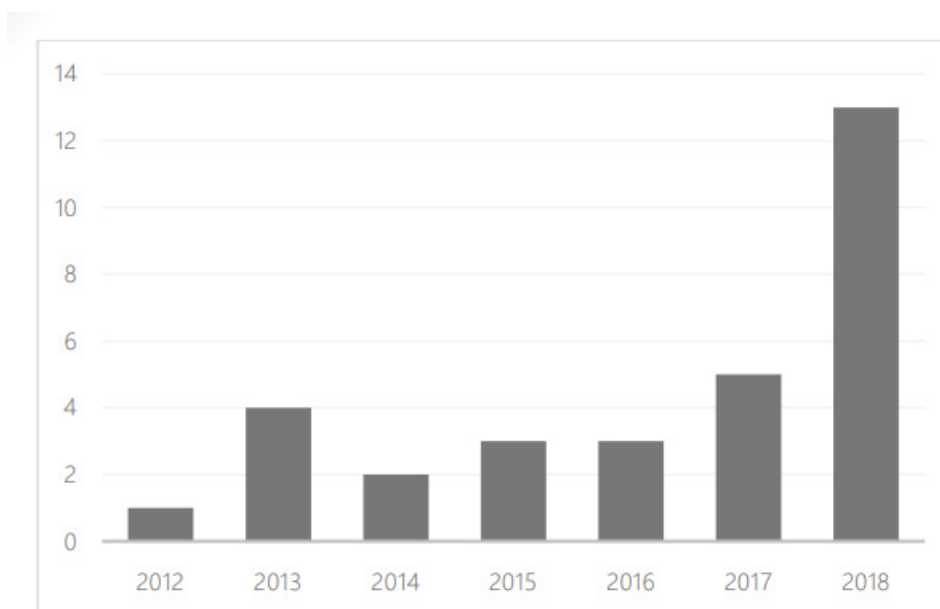
A madeira utilizada para produção do painel no Brasil é oriunda de florestas plantadas de *Pinus* e *Eucalyptus* localizadas em sua maioria na região sul e sudeste do país. Estas espécies exóticas possuem rotações muito curtas e o Brasil é reconhecido mundialmente pela alta produtividade, considerando o volume de madeira produzido por área ao ano nessas florestas (IBÁ, 2019).

2.3.5 CLT no Brasil

Atualmente, no Brasil, só existe uma empresa operando na produção do CLT. Esta empresa é a CROSSLAM e está localizada no Estado de São Paulo, na cidade de Suzano e foi fundada em 2012. Esta empresa utiliza madeira de *Pinus Taeda* e, em casos específicos, *Eucalyptus grandis* (CROSSLAM, 2020).

Entre 2012 e 2018 foram construídas 31 edificações com este material produzido no Brasil (OLIVEIRA, 2018).

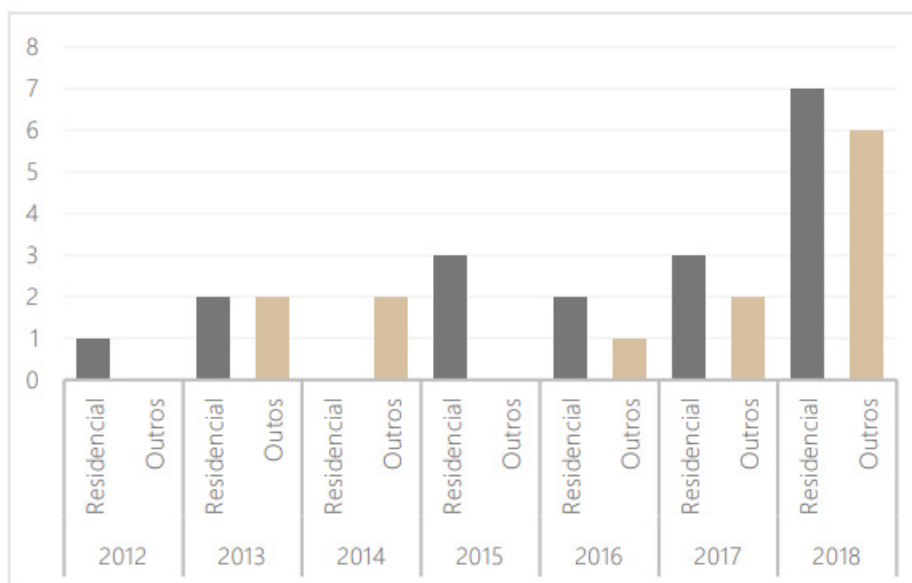
FIGURA 5 EDIFICAÇÕES EM CROSS LAMINATED TIMBER CONSTRUÍDAS POR ANO NO BRASIL



FONTE: Oliveira (2018)

Oliveira (2018) observa que a partir do 5º ano de produção – 2016 – o número de edificações cresce de forma exponencial e que a maioria das edificações levantadas em seu estudo eram residências unifamiliares (58%). A autora atribui a característica de uso residencial ao pioneirismo do material no país e ao fato de que este uso envolve um menor número de *stakeholders* e exige, portanto, menor burocracia.

FIGURA 6 EDIFICAÇÕES EM CLT POR USO E ANO NO BRASIL



FONTE: Oliveira (2018)

É previsto que a empresa AMATA inicie sua produção de painéis na região sul do país no ano de 2022, com a utilização da madeira oriunda de *Pinus spp.* e capacidade produtiva prevista em 60000 m³ de madeira engenheirada (AMATA, 2020).

2.3.6 Pesquisas desenvolvidas sobre o CLT no contexto Brasil

Devido à contemporaneidade do uso e produção deste painel estrutural no Brasil não há uma bibliografia extensa e consolidada no país. Porém, pesquisadores brasileiros tem cada vez mais se dedicado a este tema e pôde-se encontrar em busca na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações Brasileiras (BDTD, 2020) 11 trabalhos considerados relevantes apresentados na TABELA 2 a seguir.

TABELA 2 - ESTUDOS LEVANTADOS EM BUSCA NA BIBLIOTECA DIGITAL DE TESES E DISSERTAÇÕES BRASILEIRAS

TÍTULO	AUTORES	ANO	LOCAL	OBJETIVO	RESULTADOS
<i>Cross Laminated Timber: Diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no estado de São Paulo</i>	PASSARELI, R.N.	2013	São Carlos, SP	Estabelecer diretrizes para projeto de painel maciço em madeira adequado ao setor madeireiro paulista.	A partir de características do produto e sua influência no processo produtivo com as possibilidades e limitações proporcionadas pelo setor madeireiro paulista, foram elaboradas diretrizes para o projeto de um painel maciço em madeira e laminação cruzada
<i>Metodologia para estudo da caracterização estrutural de</i>	PEREIRA, M.C.N.	2014	São Carlos, SP	Contribuir para a normatização do produto no Brasil, desenvolvendo	O autor produziu um painel utilizando <i>Pinus elliotti</i> e adesivo estrutural a base de Melamina Ureia Formaldeído (MUF) para realizar os ensaios mecânicos por

painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada				uma metodologia de ensaios para a caracterização estrutural dos painéis CLT	ele definidos. Encontrou valores para os módulos de rigidez de rolling shear e de compressão similares aos recomendados pelas normas europeia e americana, porém para o módulo de elasticidade, os valores ficaram abaixo do recomendado.
Sistema construtivo em madeira laminada colada cruzada ou Cross Laminated Timber (CLT): análise da viabilidade técnica da madeira com baixo valor agregado	ALENCAR, J.B.M.	2015	Londrina PR	Analisar o desempenho estrutural dos painéis CLT produzidos com <i>Pinus spp.</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> .	Os resultados encontrados pela autora demonstraram que os painéis executados com madeira oriunda de <i>Pinus spp.</i> apresentaram maior flexibilidade e resistência que os painéis feitos com <i>Eucalyptus grandis</i> .
Viabilidade técnica do uso de madeira de Pinus taeda e Eucalyptus grandis na fabricação de painéis CLT – Cross Laminated Timber	LESSA, R.	2017	Blumenu, SC	Avaliar a viabilidade do uso de madeiras provenientes de <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> para a produção de CLT.	O autor encontrou correlação estatística entre a massa específica aparente e a rigidez à flexão. O autor conclui que a utilização da madeira reflorestada de <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> é possível mediante o desenvolvimento do processo de fabricação com o objetivo de aumentar os padrões de qualidade para a melhor aceitação da tecnologia no mercado.
Produção e caracterização mecânica de painéis de Cross Laminated Timber (CLT) para aplicação como placas de piso	ECKER, T.W.P.	2017	Maringá, PR	Analisar o desempenho de painéis CLT utilizados como placa de piso, sendo estes, fabricados com três camadas ortogonais de lamelas de madeira de <i>Pinus</i> e coladas com adesivo Poliuretano Monocomponente	A autora realizou ensaios de flexão e cisalhamento de acordo com a norma ASTM 198: 2009 e avaliou a eficiência de colagem das lamelas com a variação da quantidade de adesivo aplicado. Ecker (2017) observou que existe uma relação entre o módulo de elasticidade dos painéis com o módulo de elasticidade das lamelas utilizadas e que a quantidade de adesivo influencia fortemente o desempenho mecânico dos painéis, recomendando o uso igual ou superior a 200 g/m ² .
Modelagem e simulação da flexão estática de painéis Cross Laminated Timber pelo método de elementos finitos	PARUCKER, F.F.	2018	Blumenu, SC	Realizar simulações em método de elementos finitos para analisar as propriedades mecânicas dos painéis CLT.	O modelo matemático, desenvolvido pelo autor, permitiu a análise do efeito das propriedades mecânicas de cada lamela no desempenho do painel e mostrou que grandes diferenças podem ocorrer apenas com a forma de obtenção da matriz anisotrópica, ou ainda pela disposição das lamelas no painel.
Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho	OLIVEIRA, G.L.	2018	São Paulo, SP	Propor recomendações para projetos arquitetônicos que utilizem o CLT como material construtivo no Brasil, e estudar o desempenho deste material quanto à segurança estrutural e à durabilidade	A autora conclui que o CLT é uma alternativa promissora no cenário da construção civil desde que sua aplicação seja realizada de forma planejada e apropriada, a fim de garantir seu bom desempenho.
Análise do desempenho estrutural do CLT - Cross Laminated Timber, com porto de madeira e bambu	BARRETO, M.I.M.	2018	Londrina, PR	Analisar o desempenho estrutural do <i>Cross Laminated Timber</i> and Bamboo (CLTB), composto de madeira de <i>Pinus</i>	A autora encontrou, para este tipo de painel, valores de rigidez e ruptura acima dos valores especificados pela norma americana ANSI/APA PGR 320 (2012), demonstrando um grande potencial de utilização deste produto.

				<i>spp.</i> e Dendrocalamus giganteus.	
Desempenho acústico do Cross Laminated Timber (CLT)	ZENERATO, T.S.	2019	Campinas, SP	Avaliar o desempenho acústico dos painéis CLT produzidos no Brasil, em campo e laboratório.	A autora conclui que o CLT atende a norma de desempenho brasileira para vedações verticais externas se enquadrando nos critérios mínimos exigidos tanto em campo quanto em laboratório. Porém, Zenerato (2019) identificou que o painel nacional possui isolamento acústico inferior em relação aos painéis de outros países e que o material apresenta pontos de vazamento de som. Resultados da holografia indicaram a presença de vazamentos no meio dos painéis ensaiados, possivelmente localizados em pontos onde foram feitas furações para fixadores utilizados no transporte das chapas. Levando a crer que a diminuição do número de furações pode aumentar a isolamento sonora do painel. Os resultados encontrados pela autora indicam necessidade de estudo e melhoria do desempenho acústico do CLT produzido no Brasil.
Painel estrutural de madeira maciça tipo DCLT: Estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas com ligações cavilhadas	PEREIRA, M.C.M.	2019	São Carlos, SP	Avaliar o desempenho estrutural de painéis DCLT (Dowel Cross Laminated Timber) feitos com lamelas em <i>Pinus spp.</i> e cavilhas de pau-roxo (<i>Peltogyne spp.</i> , Leguminosae).	Este painel se assemelha muito ao CLT, se diferenciando apenas pelo uso de cavilhas ao invés de adesivo estrutural. O autor desenvolveu um modelo de ensaio específico para este tipo de ligação entre os painéis e conclui que o DCLT poderia vencer vãos de até quatro metros suportando 150 kg/m ² , sendo, portanto, considerado viável para construções residenciais.
Desempenho estrutural de placas de Cross Laminated Timber submetidas à flexão	VILELA, R.	2020	Campinas, SP	Analisar o desempenho estrutural de painéis CLT por meio de ensaios e simulações numéricas.	Constatou que a resistência à flexão do painel ficou associada à tração de ligações de topo finger joint, posicionadas nas camadas inferiores, enquanto as rupturas, devido ao esforço cortante, ocorreram pela deficiência da capacidade resistente do rolling shear nas camadas transversais do CLT. Ao serem analisados os resultados de resistência e rigidez foram observadas variações relevantes. Nas análises realizadas, a diferença entre os adesivos de gramatura 220 e 250 g/m ² não apresentou interferência na rigidez e resistência das amostras.

FONTE: Autora (2021).

Observa-se que as pesquisas encontradas no BDTD têm como ano inicial 2013, um ano após o início da produção no Brasil, e ocorre um crescente no número estudos até o ano de 2018.

Observa-se também que a maioria dos estudos buscou analisar as características mecânicas do painel com as características da produção nacional (PASSARELI, 2013; PEREIRA, 2014; ALENCAR, 2015; LESSA, 2017; ECKER, 2017; PARUCKER, 2018; OLIVEIRA, 2018; ZENERATO, 2019; VILELA, 2020). Alguns estudos se diferenciaram como Barreto (2018), que analisou a possibilidade do uso

de bambu (*Dendrocalamus giganteus*) em composição com a madeira de *Pinus spp.*, e Pereira (2019), que avaliou o desempenho estrutural do *Dowel Cross Laminated Timber* com cavilhas de pau-roxo (*Peltogyne spp.*).

Entre os autores que analisaram mecanicamente o CLT composto de *Pinus spp.*, observou-se que os resultados se mostraram, em geral, satisfatórios, com a recomendação de que sejam desenvolvidos métodos de produção e análise normatizados para a produção nacional (PASSARELI, 2013; LESSA, 2017; ECKER, 2017; OLIVEIRA, 2018; ZANERATO, 2019; VILELA, 2020). Pereira (2014) encontrou valores para os módulos de rigidez de *rolling shear* e de compressão similares aos recomendados pelas normas europeia e americana, porém para o módulo de elasticidade, os valores ficaram abaixo do recomendado. Alencar (2015) analisou o desempenho estrutural dos painéis CLT produzidos com *Pinus spp.* e *Eucalyptus grandis* e encontrou que os painéis de *Pinus spp.* apresentaram maior flexibilidade e resistência que os painéis feitos com *Eucalyptus grandis*.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A demanda por materiais mais sustentáveis tem colocado biomateriais em evidência, e na construção civil, a madeira engenheirada tem se destacado. O *Cross Laminated Timber* (CLT) é um produto de madeira engenheirada composto por lamelas de madeira dispostas em camadas cruzadas ortogonalmente entre si, sendo utilizada principalmente como estrutura de placa ou chapa. Este painel é comumente apontado como um material de grande potencial que se mostra competitivo para edifícios médios e altos e possui características como fácil manuseio, alto nível de pré-fabricação e significativa leveza em relação a outros materiais construtivos.

No Brasil, estes painéis são produzidos industrialmente com madeira de florestas plantadas, em geral, do gênero *Pinus spp.* Conforme a pesquisa bibliográfica realizada neste capítulo, observa-se que é crescente o interesse sobre as propriedades físicas e mecânicas do material produzido no país e que a revisão em andamento da NBR 7190 (1997) deve incorporar requisitos de fabricação e resistência para este material e suas características no território nacional. Apesar de insipiente, a produção brasileira é crescente, bem como o número de pesquisas abordando a produção no país, o que contribui para o desenvolvimento e disseminação deste produto.

2.5 REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO II

ALENCAR, J. B. M. **Sistema construtivo em madeira laminada colada cruzada ou Cross Laminated Timber (CLT): análise da viabilidade técnica da madeira com baixo valor agregado**. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina (PR), 2018. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.uel.br/document/?code=vtls000201385>. Acesso em: 5 ago. 2020.

AMATA. Comercial. Disponível em: <https://amatabrasil.com.br/>. Acesso em: ago. 2020.

APA/ANSI. PGR 320:2018 - **Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber**. Tacoma: APA - The Engineered Wood Association, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190/1997**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BARRETO, M. I. M. **Análise Do Desempenho Estrutural Do CLTB - Cross Laminated Timber and Bamboo, Composto De Madeira E Bambu**. 2018. 124 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina (PR), 2018. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.uel.br/document/?code=vtls000220758>. Acesso em: 05 de ago. 2020.

BRANDNER, R. **Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report**. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Reinhard_Brandner/publication/261884030_Production_and_Technology_of_Cross_Laminated_Timber_CLT_A_state-of-the-art_Report/links/0f317535dfd826c0a1000000.pdf.

BRANDNER, R.; FLATSCHER G.; RINGHOFER, A. SCHICKHOFER, G. THIEL, A. **Cross Laminated Timber (CLT): overview and development**. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 3, p. 331–351, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>.

CAULFIELD, J. **A new report predicts significant demand growth for mass timber componentes**. Disponível em: <https://www.bdcnetwork.com/new-report-predicts-significant-demand-growth-mass-timber-components>.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALIZATION. **Eurocode 5: Design of timber structure - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings**. Brussels, 2004.

_____. BS EN 16351 - Timber structures - **Cross Laminated Timber** - Requirements. Brussels, 2015.

CROSSLAM. *Cross Laminated Timber*. Comercial. Disponível em: <www.crosslam.com.br>. Acesso em: ago. 2020.

EBNER, G. **CLT production is expected to double until 2020**. 2017. Disponível em: <https://www.timber-online.net/holzprodukte/2017/06/brettsper Holz-produktion-in-europa---20162020.html>. Acesso em: 10 jul. 2020.

ECKER, T. W. P. **Produção e caracterização mecânica de painéis de Cross Laminated Timber (CLT) para aplicação como placas de piso**. 2017. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual de Maringá, 2017, Maringá (PR). Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/5711>. Acesso em: 5 ago. 2020.

FOREST BUSINESS NETWORK. **North American Mass Timber: State of the Industry**. 2020. Disponível em: <https://www.masstimberreport.com/>.

HARRIS, R. *Cross Laminated Timber*. **Wood Composites**, 2015.

Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). **Relatório 2019**. 2019. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>.

KARACABEYLI, Erol; DOUGLAS, Brad. **CLT Handbook: Cross Laminated Timber**. Pointe-Claire: FPInnovations, 2013.

LESSA, R. **Viabilidade Técnica Do Uso De Madeira De Pinus Taeda E Eucalyptus Grandis Na Fabricação De Painéis CLT - Cross Laminated Timber**. 2017. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau (SC), 2017. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/FURB_11a42fe5cdd803e5138f0b69e1b30167. Acesso em: 5 de ago. 2020

OLIVEIRA, G. L. *Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho. Recomendações para o processo do projeto arquitetônico*. 2018. 194 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Arquitetura), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-09012019-144057/en.php>. Acesso em: 5 ago. 2020.

PARUCKER, F. F. **Modelagem E Simulação Da Flexão Estática De Painéis Cross Laminated Timber Pelo Método De Elementos Finitos**. 2018. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau (SC), 2018. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/FURB_6614c982e4f0354eb63495e76bdf359d. Acesso em: 5 de ago. 2020.

PASSARELLI, R. N. **Cross Laminated Timber: diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no Estado de São Paulo**. 2013. 192 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-06052014-145836/en.php>. Acesso em: 5 ago. 2020.

PEREIRA, M. C. M. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de madeira laminada colada cruzada**. 2014. 164 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 2015. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-07052015-084252/en.php>. Acesso em: 5 ago. 2020.

PEREIRA, M. C. M. **Painel estrutural de madeira maciça tipo DCLT: estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas com ligações cavilhadas**. 2019. 107 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 2019. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-20082019-141710/>. Acesso em: 5 ago. 2020.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; *et al.* The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, n. 1, p. 333-359. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>.

WALSEL, F. J.; WATTS R. L. **Composite Lumber**. Depositante: Frank J. Walsel e Robert L. Watts, Depósito: 17 de março de 1920, Concessão: 21 de agosto de 1923. Disponível em: <https://www.smartlam.com/wp-content/uploads/2020/08/US1465383.pdf> Acesso em: 10 de agosto de 2020

WAUGH THISTLETON ARCHITECTS. **100 Projects UK CLT**. Softwood Lumber Board & Forestry Innovation Investment. 2018.

VILELA, R. **Desempenho estrutural de placas de Cross Laminated Timber submetidas à flexão**. 2020. 249 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2020. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/339689>. Acesso em: 5 ago. 2020.

ZENERATO, T. S. **Desempenho acústico do Cross Laminated Timber (CLT)**. 2019. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2020. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/334618>. Acesso em: 5 ago. 2020.

3 CAPÍTULO III: REVISÃO SISTEMÁTICA DE ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CLT

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma revisão sistemática que abordou o tema da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao ciclo de vida do painel *Cross Laminated Timber*.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de gestão ambiental de natureza quantitativa e seus resultados provém do mapeamento de todas as emissões e consumo de recursos de um processo produtivo, fornecendo subsídios para o cálculo dos impactos ambientais a eles relacionados (HAUSCHILD, ROSENBAUM, OLSEN, 2017). A partir do estudo detalhado do ciclo de vida é possível encontrar pontos de melhoria nos processos de produção, o que contribui para uma a melhor gestão ambiental e tomada de decisão a favor da sustentabilidade dos processos produtivos (ISO, 2006a; ILCD 2010; GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2012). Esta visão abrangente sob a perspectiva do ciclo de vida é uma das maiores potencialidades da ACV, porém isto também impõe simplificações e generalizações na modelagem do estudo, acarretando incertezas no mapeamento do consumo de recursos e emissões, e por isso, mais corretamente se diz que a ACV calcula potenciais impactos ambientais (HAUSCHILD, ROSENBAUM, OLSEN, 2017).

A ACV divide-se em quatro etapas ou fases: Definição de objetivo e escopo; Análise de inventário (ICV); Avaliação de Impactos (AICV); e interpretação (ISO, 2006a), e se caracteriza como uma técnica iterativa, já que suas fases individuais utilizam os resultados das fases subsequentes (ISO, 2006a).

A definição do objetivo e do escopo define os propósitos, público-alvo, fronteiras do sistema e unidade funcional. O ICV envolve a coleta de dados e cálculos para quantificar a entrada e a saída de material e energia de um sistema de produto, enquanto AICV avalia a significância dos possíveis impactos ambientais com base no ICV e, por fim, a interpretação avalia os achados para chegar a conclusões e fazer recomendações sobre o sistema de produto ou processo produtivo, de acordo com a finalidade e escopo do estudo, definidos na primeira fase (GONG *et al.*, 2012).

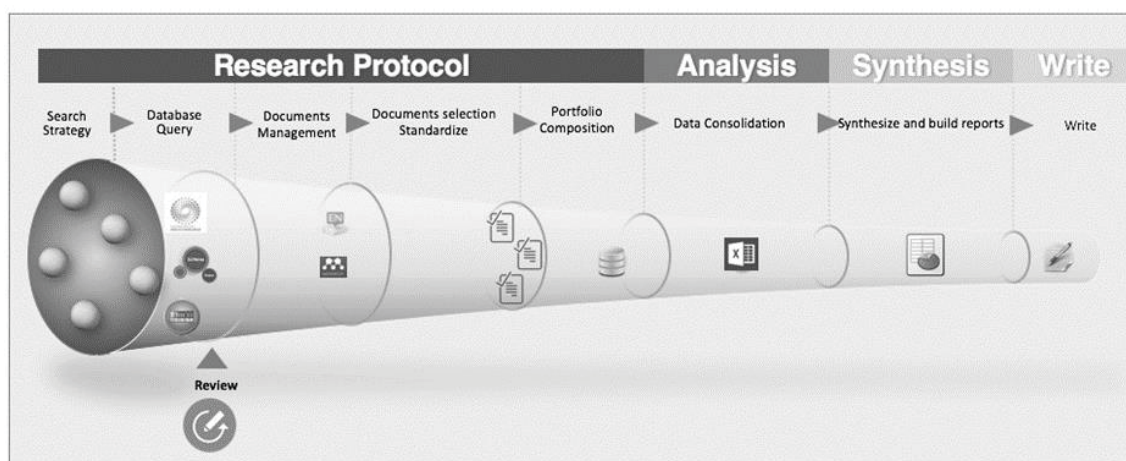
O objetivo deste capítulo foi observar como os estudos mais recentes têm sido desenvolvidos metodologicamente em termos de escopo e quais são as principais

lacunas científicas apresentadas nos estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do material ao longo do seu ciclo de vida.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A revisão sistemática de literatura baseou-se no método *Systematic Search Flow* (SSF) proposto por Ferenhof e Fernandes (2016) composto por quatro fases e oito atividades, observados na FIGURA 7.

FIGURA 7: ETAPAS DO MÉTODO SYSTEMATIC SEARCH FLOW (SSF)



FONTE: Adaptado de Ferenhof e Fernandes (2016).

A primeira fase denominada definição do protocolo de pesquisa foi executada em cinco etapas, descritas abaixo:

I) Definição de estratégia de busca

Foram definidas, para a busca sistemática, as bases de dados *Science Direct*, *Web of Science* e *ProQuest*, devido à multidisciplinaridade de estudos e referências no âmbito internacional. Para atender ao escopo do estudo, as palavras-chave abordaram o tema da ACV e suas etapas (ICV e AICV) em combinação com o *Cross Laminated Timber*, gerando a seguinte combinação: ("LCA" OR "Life Cycle Assessment" OR "LCI" OR "Life Cycle Inventory") AND ("CLT" OR "Cross Laminated Timber").

Para seleção dos artigos, foram definidos os critérios de inclusão demonstrados na TABELA 3:

TABELA 3: CRITÉRIOS DE SELEÇÃO PARA REVISÃO DE LITERATURA

RELACIONADO A	CRITÉRIO DE INCLUSÃO
Horizonte temporal	Publicados a partir de 2000.
Tipo de Publicação	Artigos revisado por seus pares, de revistas científicas, excluindo literatura cinzenta e artigos de revisão de literatura.
Língua	Em inglês.
Estágio do ciclo de vida	Estudos que abordassem pelo menos uma etapa do ciclo de vida do CLT, deixando clara a inclusão do material no escopo.
Tipo de dado	Estudos que reportassem dados quantitativos de ACV.

FONTE: Autora (2020).

II) Consulta em bases de dados

A pesquisa nas bases de dados foi realizada no dia 3 de abril de 2020 e a *query* definida em I foi aplicada ao título, resumo e palavras-chave dos documentos disponíveis. As bases de dados retornaram o seguinte número de artigos: *Science Direct* (117), *Web of Science* (29) e *ProQuest* (33), totalizando 179 artigos.

III) Gestão de documentos

Esta etapa envolveu a gestão das bibliografias e referências de artigos. Para tanto, as referências levantadas foram importadas para um software gerenciador de referências - Mendeley. Foram excluídos os trabalhos duplicados, o que resultou em 164 documentos a serem avaliados em uma primeira triagem.

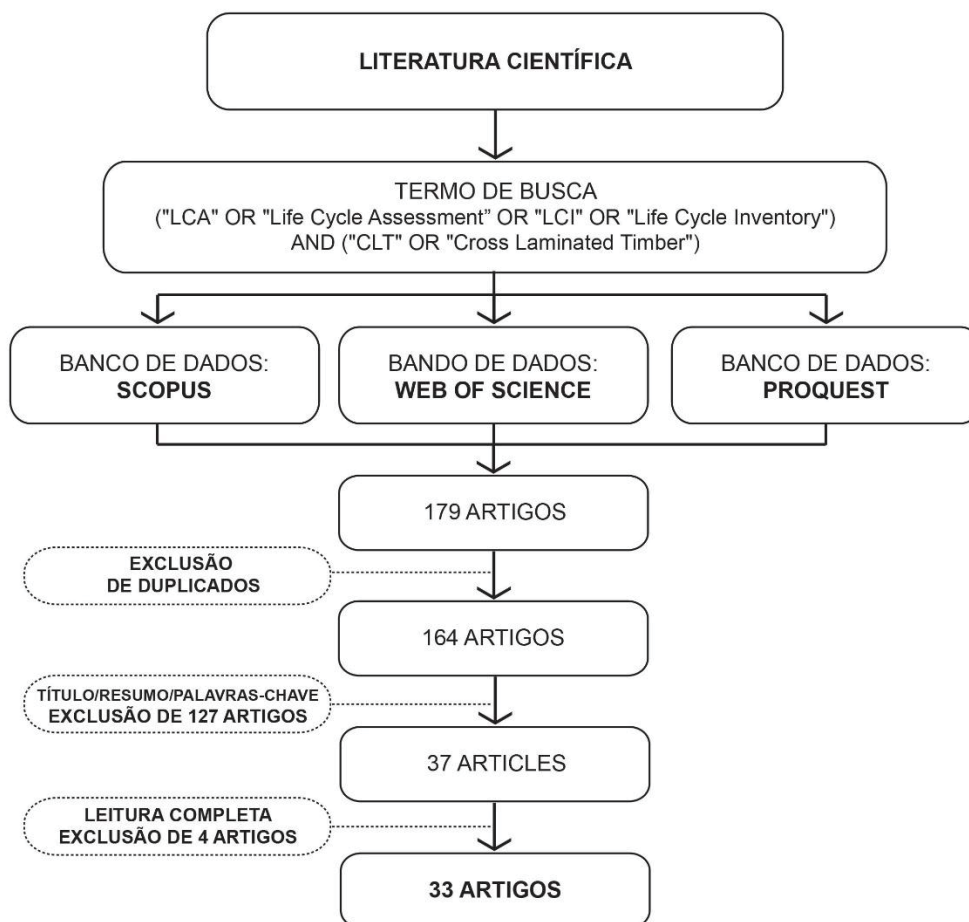
IV) Padronização e seleção de documentos

Uma triagem dos artigos foi feita a partir da leitura do título, resumo e palavras-chave com base nos critérios definidos em I. Esta seleção resultou em 37 artigos para leitura completa.

V) Composição do portfólio de artigos

Para a sintetização e categorização das informações relevantes para o escopo deste estudo, foi elaborada uma planilha para o gerenciamento dos dados levantados a partir dos estudos. Durante a leitura dos documentos, ainda foi possível identificar que alguns artigos não demonstravam aderência aos critérios descritos anteriormente, sendo excluídos mais três artigos. Sendo assim, 33 artigos científicos foram incluídos nesta revisão, como indica a FIGURA 8:

FIGURA 8 - PROCESSAMENTO SISTEMÁTICO DE REVISÃO NA LITERATURA CIENTÍFICA.



FONTE: Autora (2020).

As outras etapas propostas por Ferenhof e Fernandes (2016) são Análise, Síntese e Escrita, e estão apresentadas como resultados neste estudo.

3.3 RESULTADOS DA REVISÃO E DISCUSSÃO

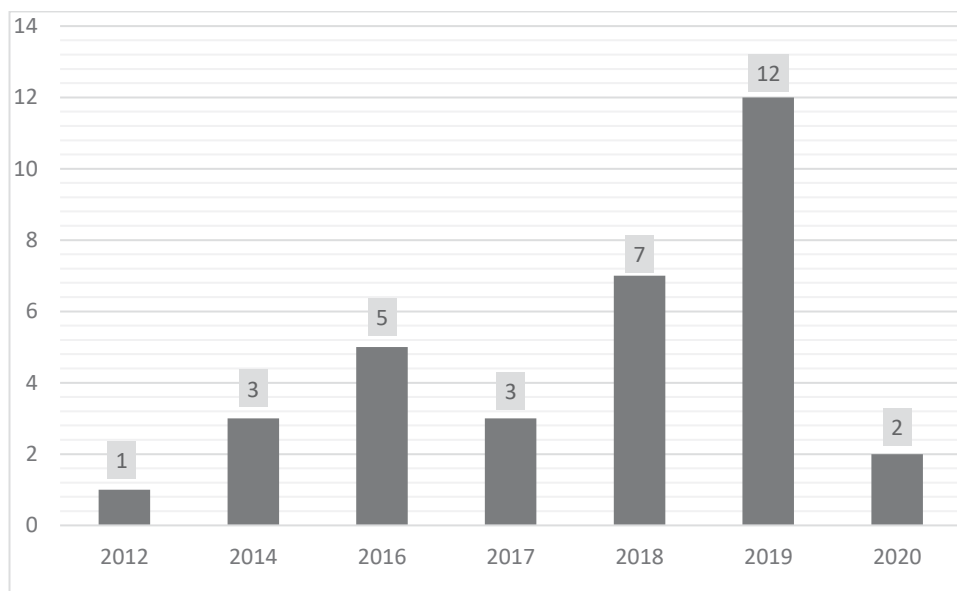
3.3.1 Características básicas dos estudos

As características básicas dos estudos selecionados estão apresentadas na Tabela 4, onde encontram-se dados gerais como autores, ano de publicação, país, objetivo do estudo, fronteiras, unidade funcional e categorias de impacto avaliadas.

Apesar do recorte temporal ter sido estabelecido entre 2000 e abril de 2020, observa-se que a seleção de trabalhos resultou em publicações mais recentes, sendo a mais antiga datada de 2012 (ROBERTSON, LAM, COLE; 2012). A partir de 2014, ocorre um crescente de publicações, culminando em 13 publicações no ano de 2019,

ver FIGURA 9. Como a busca nas bases ocorreu no início de 2020, foram encontrados apenas 2 artigos publicados neste ano dentro dos critérios definidos.

FIGURA 9 – EVOLUÇÃO DE PUBLICAÇÕES SOBRE CLT/ACV NO PERÍODO DE 2000 A 2020



FONTE: Autora (2020).

Quanto à origem das pesquisas, a totalidade dos trabalhos é oriunda do hemisfério norte, destacando-se países da América do Norte (Estados Unidos da América e Canadá) e Europa. Na Ásia, apenas a China publicou, destacando-se com 6 publicações. Não foram identificadas no escopo deste estudo publicações brasileiras, com ou sem dados nacionais.

Quanto ao tipo de estudo, a grande maioria (32/33) são Avaliações do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e apenas 1 estudo foi de Inventário do Ciclo de Vida (ICV).

TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DOS ESTUDOS SELECIONADOS

N°	ANO	AUTORES	PAÍS	OBJETIVO	TIPO DE ESTUDO	UNID. FUNCIONAL	FRONTEIRAS	CATEGORIAS DE IMPACTO AVALIADAS
1	2019	CHEN, PIEROBON, GANGULY	EUA	avaliar os impactos ambientais da produção de painéis CLT	AICV	1m³ painel	berço-ao-portão	potencial de aquecimento global; acidificação; smog fotoquímico; eutrofização e depleção da camada de ozônio
2	2018	CHINFORUSH, AKBARNEZHAD, XIAO	China	análise do uso da energia do ciclo de vida de diferentes materiais de piso	AICV	1m² de piso/laje	berço-ao-túmulo	consumo de recursos energéticos
3	2018	CONNOLLY <i>et al.</i>	Canadá	verificar a viabilidade estrutural e ambiental do uso do CLT em comparação ao concreto	AICV	núcleo rígido do edifício	berço-ao-portão	potencial de aquecimento global; acidificação; eutrofização; depleção da camada de ozônio, esgotamento de recursos energéticos não renováveis
4	2019	CORRADINI, PIEROBON, ZANETTI	Itália	análise ambiental de parede massiv holz mauer	AICV	1m² de parede	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global; acidificação; eutrofização; depleção da camada de ozônio; esgotamento de recursos energéticos não renováveis; eco toxicidade; efeito do câncer de toxicidade humana; efeito não canceroso da toxicidade humana; radiação ionizante, efeito na saúde humana
5	2014a	DODOO, GUSTAVSSON, SATHRE	Suécia	analisar implicações do ciclo de vida do carbono de três edifícios com sistemas estruturais de madeira	AICV	1m² de edifício de com vida útil de 50 anos	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global
6	2014b	DODOO, GUSTAVSSON, SATHRE	Suécia	investigar balanços energéticos primários do ciclo de vida de um edifício	AICV	1m² de edifício de com vida útil de 50 anos	berço-ao-túmulo	consumo de recursos energéticos
7	2019	DONG <i>et al.</i>	China	comparar o desempenho energético entre um edifício em CLT ou concreto	AICV	1m² da edificação	portão-ao-portão	consumo de recursos energéticos
8	2018	SALLES E PORTUGAL <i>et al.</i>	EUA	quantificar os impactos ambientais de um sistema de piso em concreto e cortiça, ambos em composição com o CLT	AICV	11 m² de piso que atendem a uma classificação IIC e STC de 50 para desempenho acústico	berço-ao-portão	potencial de aquecimento global
9	2017	GUO <i>et al.</i>	China	investigar o desempenho de economia de energia e redução de carbono de edifícios residenciais em CLT na região fria da china	AICV	1m² da edificação	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global e consumo de recursos energéticos
10	2020	GUO <i>et al.</i>	China	investigar a sustentabilidade energética de edifícios em CLT e palha em comparação com o concreto armado na china	AICV	1m² da edificação	portão-ao-portão	consumo de recursos energéticos

N°	ANO	AUTORES	PAÍS	OBJETIVO	TIPO DE ESTUDO	UNID. FUNCIONAL	FRONTEIRAS	CATEGORIAS DE IMPACTO AVALIADAS
11	2018	HAFNER E RÜTER	Alemanha	estabelecer um método para avaliar o impacto ambiental de potencial de aquecimento global de edifícios de madeira em nível nacional	AICV	1 m² de área bruta (GEA) do sistema de produto "edifício" ao longo de um ciclo de vida de 50 anos	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global
12	2017	HAFNER E SCHÄFER	Alemanha	calcular fatores de substituição que descrevem o potencial de redução de gases de efeito estufa que ocorre ao usar madeira em vez de material mineral na construção de edifícios	AICV	1 m² de área bruta (GEA) de 1 edifício ao longo de um ciclo de vida de 50 anos	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global
13	2019	HONIC, KOVACIC, RECHBERGER	Austria	testar a metodologia a fim de verificar se o mp (<i>material passport</i>) pode apoiar e potencializar a melhoria do potencial de reciclagem e do impacto ambiental dos edifícios.	AICV	1m² de parede externa	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global; acidificação; consumo de recursos energéticos
14	2018	INVIDIATA, LAVAGNA, GHISI	Itália	propor um método que combine conforto térmico adaptativo, alterações climáticas, avaliação do ciclo de vida	AICV	1 edificação	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global e consumo de recursos energéticos
15	2016	KOVACIC, WALTEBEREG E, GOURLIS	Áustria	aplicação da ferramenta para análise do ciclo de vida econômico e ambiental de sistemas de fachada EEFA	AICV	1m² de fachada com vida útil de 35 anos	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global; acidificação; consumo de recursos energéticos
16	2019	LESKOVAR <i>et al.</i>	Eslovênia	examinar as características ambientais de tipologias de construção de madeira relacionadas com formas residenciais menores	AICV	1m² de edificação de diferentes tipologias, com 50 e 100 anos de vida útil.	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global; acidificação; consumo de recursos energéticos
17	2016	LIU <i>et al.</i>	China	comparar e discutir a viabilidade do uso de CLT em habitações residenciais de médio porte	AICV	1m² do edifício com vida útil de 50 anos	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global e consumo de recursos energéticos
18	2019	LOLLI, FUFA, WIK	Suíça e Noruega	analisar e comparar as emissões incorporadas e operacionais de gases do efeito estufa (GEE) de dois edifícios de energia quase zero	AICV	1 m² de piso de vida útil estimada de 50 anos dos edifícios.	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global
19	2020	MITTERPACH, IGAZ, STEFKO	Eslováquia	apresentar os resultados de avaliação de impactos ambientais do material de montagem e tipo de construção das paredes externas de edifícios de madeira	AICV	1m² de parede	berço-ao-portão	toxicidade humana, eco toxicidade, potencial de aquecimento global, consumo de recursos
20	2018	MONCASTER <i>et al.</i>	Reino Unido	identificar e quantificar as três principais áreas de variação metodológica de ACV: diferenças temporais nas etapas consideradas; diferenças espaciais nos	AICV	1m² de edificação	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global

N°	ANO	AUTORES	PAÍS	OBJETIVO	TIPO DE ESTUDO	UNID. FUNCIONAL	FRONTEIRAS	CATEGORIAS DE IMPACTO AVALIADAS
				limites do material; e disparidades físicas nos coeficientes de dados				
21	2017	PAL <i>et al.</i>	Finlândia	demonstrar uma abordagem de ciclo de vida na otimização das soluções de projeto	AICV	edificação	berço-ao-portão	potencial de aquecimento global e consumo de recursos energéticos
22	2016	PEÑALOZA, ERLANDSSON, FALK	Suécia	estudar as implicações do impacto climático do aumento do conteúdo de material de base biológica em edifícios multifamiliares de baixo consumo energético	AICV	1m ² de edificação com vida útil de 50 anos	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global
23	2019	PEÑALOZA <i>et al.</i>	Suécia	explorar como diferentes suposições sobre os limites do sistema e definição de linhas de base para o crescimento florestal afetam o resultado das avaliações de impacto climático de produtos florestais	AICV	1 m ² de área de estar em conformidade com o padrão técnico de casa passiva por 50 anos	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global
24	2019	PIEROBON <i>et al.</i>	EUA	o impacto ambiental do berço-ao-portão de um edifício comercial híbrido, de altura média e de madeira laminada cruzada (CLT) é avaliado e comparado ao de um edifício de concreto armado com características funcionais semelhantes	AICV	1 m ² de área total do edifício	berço-ao-portão	potencial de aquecimento global; acidificação; smog; eutrofização e depleção da camada de ozônio
25	2019	PUETTMANN, SINHA, GANGULY	EUA	Realizar uma avaliação do ciclo de vida do berço ao portão da madeira laminada cruzada (CLT) produzida em Oregon, EUA.	AICV	1m ³ de painel CLT	berço-ao-portão	potencial de aquecimento global; acidificação; smog; eutrofização e depleção da camada de ozônio
26	2012	ROBERTSON, LAM, COLE	Canadá	quantificar e comparar os impactos ambientais associados para um edifício comercial típico da América do Norte, considerando dois cenários: uma estrutura tradicional de concreto armado moldado in loco e um design híbrido de MLC e CLT.	AICV	edificação de 5 andares	berço-ao-portão	potencial de aquecimento global; acidificação; eutrofização; depleção da camada de ozônio; esgotamento de recursos energéticos não renováveis; eco toxicidade; efeito na saúde humana
27	2016	SANTI <i>et al.</i>	Itália	Realizar uma avaliação comparativa do ciclo de vida entre um sistema de parede MHM (um novo sistema de construção dentro do grupo de sistemas CLT) e uma parede de tijolos.	AICV	1 m ² de parede externa	berço-ao-portão	potencial de aquecimento global; depleção da camada de ozônio; smog; efeito na saúde humana
28	2016	SKULLESTAD, BOHNE, LOHNE	EUA/Noruega	avaliar o potencial de redução de emissões GEE por parte de edificações multifamiliares por meio da substituição de estrutura de concreto armado por uma estrutura funcionalmente equivalente de madeira	AICV	Edificação com vida útil de 60 anos.	berço-ao-portão	potencial de aquecimento global e consumo de recursos energéticos
29	2014	TAKANO <i>et al.</i>	Finlândia	Comparar os resultados de ACVs desenvolvidas com 5 bases de dados, em termos de valores de	AICV	Três edificações com a mesma	berço-ao-portão	potencial de aquecimento global

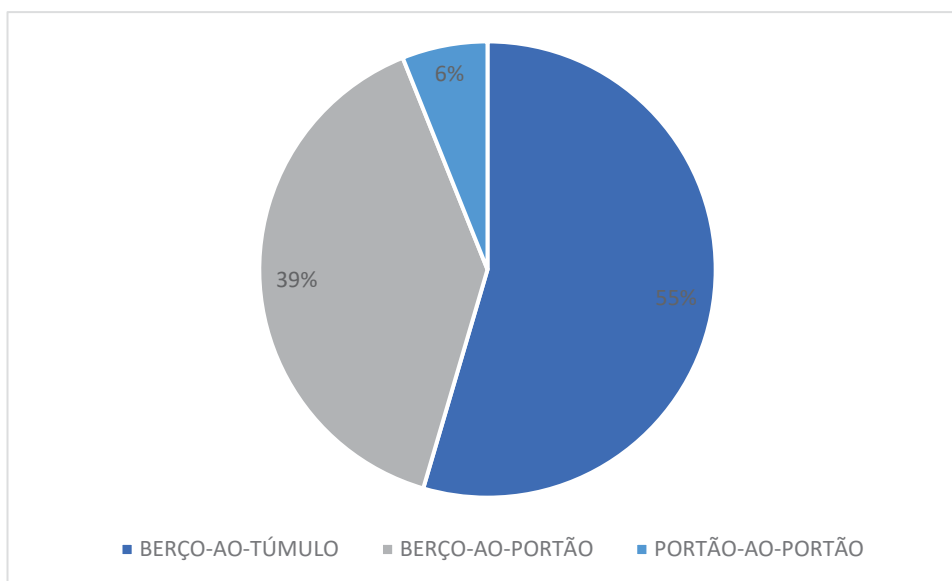
N°	ANO	AUTORES	PAÍS	OBJETIVO	TIPO DE ESTUDO	UNID. FUNCIONAL	FRONTEIRAS	CATEGORIAS DE IMPACTO AVALIADAS
				emissão de GEE na fase de produção de materiais de três edifícios de referência		área interior (10,14 m ²) e mesmo valor transmitância térmica		
30	2019	TETLEY, DODOO, GUSTAVSSON	Suécia	Analisar as implicações do uso de energia primária de uma edificação residencial multifamiliar com diferentes sistemas de estrutura (CLT, construção modular pré-fabricada em madeira, e concreto) por uma perspectiva de ciclo de vida	AICV	3 edificações - CLT, modular em madeira, concreto – funcionalmente equivalentes e vida útil de 80 anos	berço-ao-túmulo	consumo de recursos energéticos
31	2019	VIDAL, SÁNCHEZ-PANTOJA, MARTÍNEZ	Espanha	Avaliar as questões/ pontos ambientais relevantes da madeira em uma edificação residencial recém-construída em CLT, em Granada (sul da Espanha).	AICV	1 m ² de área de piso	berço-ao-túmulo	potencial de aquecimento global; acidificação; eutrofização; depleção da camada de ozônio; esgotamento de recursos energéticos não renováveis; esgotamento de recursos materiais;
32	2019	ZEITZ, GRIFFIN, DUSICKA	---	Determinar se o uso de madeira massiva como um sistema estrutural fornece vantagens sobre outros sistemas estruturais em relação ao impacto de aquecimento global e consumo energético.	ICV	m ² de área de estacionamento	berço-ao-portão	-
33	2018	ZIGART <i>et al.</i>	Eslovênia	Fornecer uma comparação dos impactos ambientais de cinco paredes e quatro componentes de envelope de construção de telhado com quatro sistemas estruturais diferentes - concreto armado, tijolo, CLT, e estrutura leve de madeira.	AICV	1 m ² de telhado ou componente de parede, com mesmo coeficiente de transmitância térmica de U = 0.10 W/m ² K.	berço-ao-portão	potencial de aquecimento global; acidificação; consumo de recursos energéticos

FONTE: Autora (2020).

3.3.2 FRONTEIRAS DOS ESTUDOS

A Avaliação do Ciclo de vida avalia os potenciais impactos associados a um sistema de produto através do inventário dos fluxos de entrada e saída do ciclo de vida. Tais fluxos podem ser quantificados dentro de todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração e aquisição de matérias-primas (berço), até sua disposição final (túmulo), com base nos objetivos e escopo definidos (ISO, 2006). As fronteiras do sistema se referem a um conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte de um sistema de produto (ISO, 2006), podendo ser definidas como berço-ao-túmulo, berço-ao-portão, portão-ao-portão. A partir da análise dos estudos, observa-se na FIGURA 10 a distribuição dos estudos por fronteira.

FIGURA 10 - FRONTEIRAS DOS ESTUDOS CLT/ACV



FONTE: Autora (2020).

A maioria dos estudos (55%) adotou uma fronteira do berço-ao-túmulo, ou seja, teve como objeto da análise todo o ciclo de vida do produto, desde a extração de matérias-primas até o descarte ou reciclagem (CHINIFORUSH, AKBARNEZHAD, XIAO, 2018; CORRADINI, PIEROBON, ZANETTI, 2019; DODOO, GUSTAVSSON, SATHRE, 2014a; DODOO, GUSTAVSSON, SATHRE, 2014b; GUO *et al.*, 2017; HAFNER e RÜTER, 2018; HAFNER e SCHÄFER, 2017; HONIC, KOVACIC, RECHBERGER, 2016; LESKOVAR *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2016; MONCASTER *et al.*,

2018; PEÑALOZA, ERLANDSSON, FALK, 2016; PEÑALOZA *et al.*, 2019; TETTEY, DODOO, GUSTAVSSON, 2019; VIDAL, SÁNCHEZ-PANTOJA, MARTÍNEZ, 2019).

Cerca de 39% dos estudos adotaram uma fronteira do berço-ao-portão, ou seja, considerou o ciclo de vida da extração das matérias-primas até algum ponto do ciclo de vida do sistema de produto (CHEN, PIEROBON, GANGULY, 2019; CONNOLLY *et al.*, 2018; SALLES E PORTUGAL *et al.*, 2018; MITTERPACH, IGAZ, STEFKO, 2020; PAL *et al.*, 2017; PIEROBON *et al.*, 2019; PUETTMANN, SINHA, GANGULY, 2019; ROBERTSON, LAM, COLE, 2012; SANTI *et al.*, 2016; SKULLESTAD, BOHNE, LOHNE, 2016; TAKANO *et al.*, 2014; ZEITZ, GRIFFIN, DUSICKA, 2019; ZIGART *et al.*, 2018).

A fronteira do portão-ao-portão foi a menos adotada e abrangeu apenas 6% da seleção (DONG *et al.*, 2019). Este estudo é mais pontual e abrange um trecho específico do ciclo de vida. Dong *et al.* (2019) avalia apenas o consumo energético do edifício em CLT, ou seja, a fase operacional do ciclo de vida e compara com o consumo energético de um edifício em concreto.

Alguns autores fazem recomendações a respeito de como e o que deve ser incluído nas fronteiras. Takano *et al.* (2019) recomendam que sejam incluídas, para materiais lenhosos, as atividades de transporte, principalmente os adquiridos por exportação. Recomendam também, que a declaração das fronteiras seja clara e transparente a fim de permitir a comparação entre os diferentes materiais. Moncaster *et al.* (2018) reforçam que cálculos de ACV mal definidos podem alterar os resultados e que os dados devem ser claros e detalhados. Robertson, Lam e Cole (2012) observam que a modelagem do estudo pode alterar os resultados como por exemplo a inclusão/exclusão de energia incorporada na matéria-prima

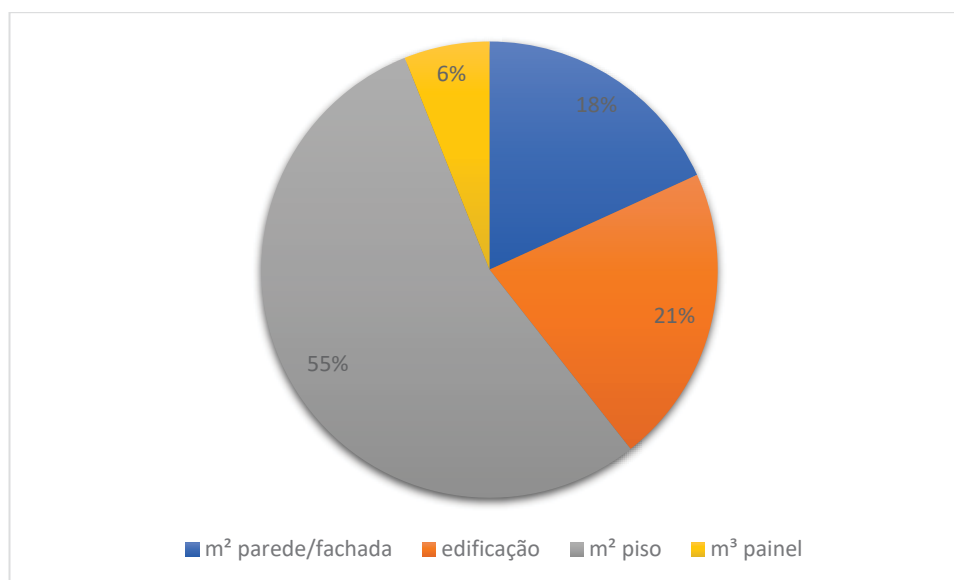
3.3.3 UNIDADE FUNCIONAL

A Unidade Funcional (UF) designa e quantifica os aspectos qualitativos e quantitativos da(s) função(ões), juntamente com as perguntas “o quê”, “quanto”, “quão bem” e “por quanto tempo” (ILCD, 2014). Quando não é possível fornecer todas estas informações, são estipulados valores mais simples de massa, volume, área, peças ou unidades semelhantes, chamados de “unidade declarada” (ILCD, 2010). A definição da unidade funcional (UF) da ACV é um elemento-chave para o desenvolvimento dos estudos. Segundo a ISO 14040 (2006) a UF serve para quantificar as funções

desempenhadas por um produto, além de ser a referência para todas as entradas e saídas da cadeia produtiva abordada e seus respectivos resultados ambientais.

Os estudos selecionados neste trabalho, em sua maioria, adotaram uma unidade funcional em termos de m^2 de piso/laje (55%). Também aparecem como unidade funcional a edificação definida pelo estudo (21%), o m^2 de parede/fachada (18%) e o m^3 de painel (6%). Ver FIGURA 11.

FIGURA 11 - UNIDADE FUNCIONAL DOS ESTUDOS CLT/ACV



FONTE: Autora (2020).

Como grande parte dos estudos abordou o CLT aplicado na edificação, as unidades funcionais são na maioria por área de edificação, parede ou piso com a consideração da vida útil (entre 50-100 anos) e características de cada aplicação. Apenas dois dos estudos selecionados adotaram a unidade funcional volumétrica (m^3 de painel) por se tratar de estudos do berço-ao-portão da fábrica de painel, sem a consideração da aplicação na edificação.

3.3.4 CATEGORIAS DE IMPACTO ANALISADAS

De acordo com a ISO 14040 (2009), a fase de AICV estuda as questões ambientais do ciclo de vida a partir da análise dos resultados do ICV, ou seja, ela associa os resultados do inventário às categorias de impacto. Cada categoria de impacto possui um indicador e o conjunto dos resultados dos indicadores fornece

informações sobre as questões ambientais associadas às entradas e saídas do sistema de produto.

Na seleção do escopo desta análise, observou-se que em uma escala de categorias de impacto mais calculadas para esta cadeia produtiva, encontram-se em destaque a de potencial de aquecimento global seguida de consumo de recursos energéticos, ver FIGURA 12.

FIGURA 12 - CATEGORIAS DE IMPACTO DOS ESTUDOS CLT/ACV



FONTE: Autora (2020).

A madeira como material construtivo contribui para o alcance de metas de mitigação do aquecimento global da indústria da construção civil, pois possui melhor desempenho em economia de energia e redução de emissões de carbono do que outros materiais de construção tradicionais, como tijolos, concreto armado e aço (MONAHAN e POWELL, 2011) além de funcionar como armazenamento temporário de carbono no ciclo de vida do edifício (HAFNER e RÜTER, 2018; RAMAGE *et al.*, 2017). Em decorrência destas premissas, a maioria dos estudos aborda a categoria de GWP com a finalidade de comparar um material com grande potencial de estoque de carbono, como o CLT, com outros mais energívoros e com maiores índices de emissão de GEE, como o concreto e o aço (HAFNER e SCHÄFER, 2017; LIU *et al.*, 2016; LOLLI, FUFA, WIIK, 2019; MONCASTER *et al.*, 2018; PAL *et al.*, 2017; ROBERTSON, LAM, COLE, 2012; TETTEY, DODOO, GUSTAVSSON, 2019; ZEITZ, GRIFFIN, DUSICKA, 2019; ZIGART *et al.*, 2018).

Hafner e Schäfer (2017) que calcularam um fator de substituição de madeira e material de origem mineral, relatam que a madeira possui um potencial positivo de redução de GEE. Em Liu *et al.* (2016) é apontado que o uso do CLT em substituição a materiais convencionais (aço, concreto, alvenaria de tijolos) contribuiria para redução de 30% do consumo energético e de 40% das emissões de CO₂. Lolli, Fufa e Wiik (2019), que comparam dois edifícios de energia quase zero, identificaram que o uso do CLT em substituição aos elementos de concreto estrutural pode produzir redução potencial de 6% das emissões de GEE. Moncaster *et al.* (2018) comparam o CLT com estruturas de concreto, aço e bloco estrutural e confirmam que o material de madeira engenheirada é o de menor impacto, porém escolhas metodológicas poderiam alterar os resultados em um fator 10 ou mais. Robertson, Lam e Cole (2012) também comparam o CLT com o concreto armado e relatam uma melhoria de pelo menos 14% em Potencial de Aquecimento Global (PAG). Estes autores também observam que a modelagem do estudo pode alterar os resultados como por exemplo a inclusão/exclusão de energia incorporada na matéria-prima. Zigart *et al.* (2018) comparam diferentes composições de parede e telhado com mesma condutividade térmica (concreto armado, tijolo, CLT e sistema leve de madeira) e observam que o CLT apresenta melhor desempenho em PAG devido ao estoque de CO₂.

Ainda, há estudos que abordam a análise ambiental do material da perspectiva do ciclo de vida a partir de dados primários locais e incluem a categoria de impacto de aquecimento global (CHEN, PIEROBON, GANGULY, 2019; PUETTMANN, SINHA, GANGULY, 2019). Chen, Pierobon e Ganguly (2019) reportam que a categoria de PAG para esta cadeia produtiva é sensível a fatores como o transporte e espécies de madeira, já que encontram como possível resultado a redução das emissões em cerca de 14% com a compra de madeira local e/ou de espécies mais leves. Estes autores também apontam a fabricação de resina como responsável por 30% dos resultados gerais desta categoria de impacto. Em Puettman, Sinha e Ganguly (2019), que analisaram a produção de CLT em Oregon do berço-ao-portão, apontam o uso de gás natural e a produção de resina como principais responsáveis pelas emissões de GEE.

A segunda categoria de impacto mais analisada é a de consumo de recursos energéticos por ser muito relevante para o setor da construção civil, já que este é um notável contribuinte para o aumento do consumo energético. A indústria da construção consome aproximadamente 33% da energia mundial e a Agência Internacional de

Energia (IEA) prevê um aumento em 50% da demanda até 2050, caso não haja controles adicionais aplicados (URGE-VORSATZ *et al.*, 2013; IEA, 2018). O aumento do consumo de energia leva ao aumento na queima de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, ao aumento das emissões de GEE, contribuindo para o aquecimento global e a decorrente mudança climática. Embora discussões anteriores tenham se concentrado na eficiência energética das edificações, ou seja, na fase de uso operacional da edificação, a eficiência ou desempenho dos materiais, seja quanto ao impacto do consumo de energia primária, fabricação, ou fim de vida, tem obtido maior atenção do setor (HAFNER e SCHÄFER, 2017).

Alguns dos estudos selecionados apresentam como foco apenas a análise energética do ciclo de vida do CLT em diferentes escopos (CHINIFORUSH, AKBARNEZHAD, XIAO, 2019; DODOO, GUSTAVSSON, SATHRE, 2014b; DONG *et al.*, 2019; GUO *et al.*, 2020; TETTEY, DODOO, GUSTAVSSON, 2019). Chiniforush, Akbarnezhad, Xiao (2019) fazem uma análise detalhada do ciclo de vida energético de dois tipos de laje: uma composição de aço e CLT e outra de aço e concreto. Estes autores indicam que a composição aço/CLT resultou em redução de 107,5% da energia incorporada e que os benefícios ambientais perpassam também questões como a reciclabilidade e capacidade de desconstrução do sistema.

Dodoo, Gustavsson, Sathre (2014b) fazem uma análise do ciclo de vida energético comparativa entre três sistemas construtivos em madeira: CLT, viga/pilar e estrutura modular. Os autores sugerem que o sistema em CLT reduz entre 6-16% o uso de energia primária em relação a produção em relação aos outros sistemas. Em um período de 50 anos, o sistema em CLT também reduz o consumo de energia de aquecimento e ventilação do ambiente em 11-10% em relação aos outros sistemas. Isso se deve à capacidade de estanqueidade do material e ao seu poder de substituição do isolamento térmico, necessários em maior quantidade nos outros sistemas.

Dong *et al.* (2019) comparam o desempenho energético de edifício em CLT com um de concreto armado em uma região de frio severo na China. Estes autores relatam que o sistema em CLT consome muito menos energia de aquecimento que o de concreto armado, em contrapartida, consome mais energia de refrigeração, indicando que pode ocorrer superaquecimento em edifícios com este sistema devido a sua massa térmica. Guo *et al.* (2020) também analisa comparativamente sistemas estruturais para regiões de frio severo na China, comparando o CLT com o concreto

armado e um sistema de fardos de palha. Estes autores concluem que os materiais de base biológica (CLT e palha) são mais eficientes energeticamente que o concreto armado e representam um potencial de economia energética para essas regiões.

Tettey, Dodoo e Gustavsson (2019) realizaram uma análise que aborda todos os fluxos de energia e materiais vinculados às fases do ciclo de vida dos sistemas de construção - CLT, modular em madeira, concreto - para 3 edificações funcionalmente equivalentes, incluindo produção de materiais, transporte, construção, operação e fim de vida. Estes autores reportam que os edifícios de madeira exigiram menor consumo de energia primária, já que produzem resíduos de biomassa, resultando em menor balanço de energia primária do ciclo de vida do que a opção em concreto. Relatam ainda que o poder calorífico dos resíduos de biomassa recuperáveis da fase de produção da edificação em CLT é significativamente maior do que a energia primária necessária para sua produção. Quanto à fase de uso da edificação, a diferença no aquecimento da edificação devido à massa térmica é insignificante entre o CLT e os sistemas de construção modular de madeira, já o edifício de concreto, requer aproximadamente de 26% a 35% mais energia primária. Os autores também reportam que os combustíveis fósseis representam uma parcela significativa do uso total de energia primária para a produção de materiais para todos os sistemas construtivos, constituindo em média 64, 36 e 43% para os sistemas construtivos de concreto, CLT e modulares, respectivamente. A eletricidade é responsável por 32, 38 e 40% do uso total de energia primária para a produção de materiais, respectivamente. A participação da bioenergia no uso total de energia primária para a produção de materiais é de cerca de 4, 26 e 18%. Segundo os autores, o CLT e os sistemas de construção modular fornecem equilíbrio de energia primária de ciclo de vida cerca de 20 e 9% menor do que a alternativa de concreto, no entanto, o consumo de energia para manutenção e reparos não foi considerado.

3.3.5 PRINCIPAIS LACUNAS CIENTÍFICAS APRESENTADAS PELOS ESTUDOS

Entre as lacunas científicas apresentadas pelos autores destaca-se a necessidade de estudos que abordem o uso do CLT em edificações localizadas em regiões de clima temperado e tropical, ou seja, regiões sem requisitos consideráveis de superaquecimento, a fim de analisar o consumo energético de refrigeração no decorrer da etapa operacional do ciclo de vida, entre outras implicações do uso do

material nessas regiões (DODOO, GUSTAVSSON, SATHRE, 2014a; DONG *et al.*, 2019; VIDAL, SÁNCHEZ-PANTOJA, MARTÍNEZ, 2019).

Outra questão a se considerar, foi a necessidade de estudos mais profundos a respeito da carbonatação do concreto a fim incluir os valores do carbono incorporado ao longo do ciclo de vida para uma comparação mais justa em relação aos materiais lenhosos (GUO *et al.*, 2020; LOLLI, FUFA, WIJK, 2019, SKULLESTAD, BOHNE, LOHNE, 2016).

Entre os estudos selecionados, também foi apresentada a necessidade da consideração da edificação completa, dentro de uma visão holística, para que uma avaliação mais profunda a respeito dos materiais fosse possível. Dodoo, Gustavsson e Sathre (2014b) propõe a análise de outras questões técnicas em composição com o uso do material, bem como de questões não técnicas, como por exemplo a percepção do usuário da edificação sobre o material. Hafner e Schäfer (2017) reforçam que um potencial de redução de GEE poderia surgir da consideração de outros elementos da construção como acabamentos, esquadrias e revestimentos em geral, já que a madeira na forma de materiais de revestimento e acabamento pode ser aplicada em edifícios existentes e esses efeitos poderiam ser estudados e quantificados. Zigart *et al.* (2018) reporta que para comparação entre materiais estruturais é necessária a consideração do sistema completo, já que o material funciona em conjunto com uma série de componentes, por exemplo, conexões metálicas, esquadrias específicas, revestimentos específicos etc.

Outra lacuna científica apresentada pelos estudos foi a necessidade de uma análise mais profunda a respeito dos cenários decorrentes da mudança no padrão de consumo da madeira como: disponibilidade de material, impactos causados pelo uso do solo; crescimento florestal (DODOO, GUSTAVSSON, SATHRE, 2014a; DODOO, GUSTAVSSON, SATHRE, 2014b; HAFNER e RÜTER, 2018; ROBERTSON, LAM, COLE, 2012).

Também foi apresentada como lacuna, a consideração do fim de vida e das emissões biogênicas após a vida útil do produto de madeira para a melhor compreensão do armazenamento de carbono (PAL *et al.*, 2017; SANTI *et al.*, 2016). A inclusão de uma avaliação social e econômica da cadeia produtiva do material também foi apontada como uma lacuna a ser preenchida por futuros estudos (ROBERTSON, LAM, COLE, 2012).

Uma lacuna importante encontrada neste estudo foi a ausência de estudos brasileiros que abordassem tanto a produção do material no país como o uso do painel em edificações para o clima brasileiro. Questões como o sequestro de carbono promovido pelo uso no painel e as emissões decorrentes da produção no Brasil não foram abordadas nos estudos encontrados nesta revisão bibliográfica.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliométrica realizada neste capítulo aponta que existe um interesse crescente da comunidade científica em estudar o perfil ambiental do material construtivo CLT e que, dentro do escopo da busca, não existiam até o momento, publicações com dados brasileiros ou mesmo latino-americanos desta cadeia produtiva.

Quanto às definições de escopo, observa-se que os autores têm buscado fazer análises completas da cadeia, com fronteiras do berço-ao-túmulo, com a aplicação nas edificações e a comparação com outros materiais.

É apontado como lacuna científica o fim de vida e a contabilização das emissões biogênicas decorrentes da decomposição do material. Edificações com maior quantidade de biomateriais tendem a ter menor impacto no ciclo de vida, porém a definição das fronteiras do estudo influencia nos resultados e isso deve ser sempre claro e bem explicitado no escopo dos estudos de ACV para evitar equívocos.

As unidades funcionais são em geral m^2 de edificação com vida útil variando de 50-100 anos. Poucos estudos abordaram a produção do material isoladamente, e nesses casos, a UF definida foi m^3 de painel.

Quanto às categorias de impacto analisadas, percebe-se que existe um grande interesse no potencial de mitigação do aquecimento global do material, por características inerentes, como a promoção do sequestro de carbono na biomassa e o baixo consumo de energia primária, devido também aos resíduos usados como fonte de energia dentro do próprio sistema. O uso de madeira de longa duração, como é o caso do CLT, os benefícios advindos do uso de produtos florestais podem ser afetados pelos seus respectivos ciclos de vida, pois a mitigação das mudanças climáticas está relacionada com o tempo de armazenamento de carbono e das emissões evitadas em relação aos seus substitutos fósseis e minerais. Portanto, mais estudos devem ser

conduzidos a fim de preencher as lacunas científicas e promover o melhoramento do perfil ambiental dos produtos de madeira engenheirada como o CLT.

3.5 REFERÊNCIAS CAPÍTULO III

ALAM, A.; KELLOMAKI, S.; KILPELAINEN, A.; STRANDMAN, H. Effects of stump extraction on the carbon sequestration in Norway spruce forest ecosystems under varying thinning regimes with implications for fossil fuel substitution. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 5, n. 4, p. 445–458, 2013.

CHEN, C. X.; PIEROBON, F.; GANGULY, I. Life Cycle Assessment (LCA) of Cross-Laminated Timber (CLT) produced in Western Washington: The role of logistics and wood species mix. **Sustainability**. 2019.

CHINIFORUSH, A. A.; AKBARNEZHAD, A.; VALIPOUR, H.; XIAO, J. Energy implications of using steel-timber composite (STC) elements in buildings. **Energy and Buildings**. 2018.

CONNOLLY, T.; LOSS, C.; IQBAL, A.; TANNERT, T. Feasibility Study of Mass-Timber Cores for the UBC Tall Wood Building. **Buildings**. 2018.

CORRADINI, G.; PIEROBON, F.; ZANETTI, M. Product environmental footprint of a cross-laminated timber system: a case study in Italy. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. 2019.

DODOO, A.; GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Lifecycle carbon implications of conventional and low-energy multi-storey timber building systems. **Energy and Buildings**. 2014a.

DODOO, A.; GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Lifecycle primary energy analysis of low-energy timber building systems for multi-storey residential buildings. **Energy and Buildings**. 2014b.

DONG, Y.; CUI, X.; YIN, X.; CHEN, Y.; GUO, H. Assessment of Energy Saving Potential by Replacing Conventional Materials by *Cross Laminated Timber* (CLT)-A Case Study of Office Buildings in China. **Applied Sciences**. 2019.

FERENHOF, H. A; FERNANDES, R.F. **Passos para construção da Revisão Sistemática e Bibliometria**. V. 3.07. 2016.

GONG, X.; NIE, Z.; WANG, Z.; CUI, S.; GAO, F.; ZUO, T. Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in Beijing: A comparative study. **J Ind Ecol** 16: 576–587, 2012.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. *et al.* Environmental assessment and improvement alternatives of a ventilated wooden wall from LCA and DfE perspective. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 4, p.432-443, 2 fev. 2012.

GUO, H.; LIU, Y.; MENG, Y.; HUANG, H.; SUN, C.; SHAO, Y. A Comparison of the Energy Saving and Carbon Reduction Performance between Reinforced Concrete and Cross-Laminated Timber Structures in Residential Buildings in the Severe Cold Region of China. **Sustainability**. 2017.

GUO, H.; ZHOU, S.; QIN, T.; HUANG, L.; SONG, W.; YIN, X. Energy Sustainability of Bio-Based Building Materials in the Cold and Severe Cold Regions of China - A Case Study of Residential Buildings. **Applied Sciences**. 2020.

HAFNER, A.; RÜTER, S. Method for assessing the national implications of environmental impacts from timber buildings-an exemplary study for residential buildings in Germany. **Wood and Fiber Science**. 2018.

HAFNER, A.; SCHÄFER, S. Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level. **Journal of Cleaner Production**. 2017.

HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. 2017.

HONIC, M.; KOVACIC, I.; RECHBERGER, H. Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study. **Journal of Cleaner Production**. 2019.

ILCD. ILCD Handbook - General guide on LCA - Detailed guidance. Constraints, 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Transition to sustainable buildings: Strategies and opportunities to 2050**. Available online: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Building2013_free.pdf

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040, 2006a. **Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework**. International Organization for Standardization. Geneva.

_____.ISO 14044, 2006b. **Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines**. International Organization for Standardization. Geneva.

INVIDIATA, A.; LAVAGNA, M.; GHISI, E. Selecting design strategies using multi-criteria decision making to improve the sustainability of buildings. **Building and Environment**. 2018.

KOVACIC, I.; WALTENBEREGER, L.; GOURLIS, G. Tool for life cycle analysis of facade-systems for industrial buildings. **Journal of Cleaner Production**. 2016.

LESKOVAR, V. Ž.; ŽIGART, M.; PREMROV, M.; LUKMAN, R. K. Comparative assessment of shape related cross-laminated timber building typologies focusing on environmental performance. **Journal of Cleaner Production**. 2019.

LIU, Y.; GUO, H.; SUN, C.; CHANG, W. Assessing *Cross Laminated Timber* (CLT) as an Alternative Material for Mid-Rise Residential Buildings in Cold Regions in China—A Life-Cycle Assessment Approach. **Sustainability**. 2016.

LOLLI, N.; FUFA, S. M.; WIİK, M. K. An assessment of greenhouse gas emissions from CLT and glulam in two residential nearly zero energy buildings. **Wood Material Science & Engineering**. 2019.

MITTERPACH, J.; IGAZ, R.; STEFKO, J. Environmental evaluation of alternative wood-based external wall assembly. **Acta Facultatis Xylologiae Zvolen**. 2020

MONAHAN, J.; POWELL, J.C. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. **Energy Build**. 2011, 43, 179–188

MONCASTER, A. M.; POMPONI, F.; SYMONS, K. E.; GUTHRIE, P. M. Why method matters: temporal, spatial and physical variations in LCA and their impact on choice of structural system. **Energy and Buildings**. 2018.

PAL, S. K.; TAKANO, A.; ALANNE, K.; PALONEN, M.; SIREN, K. A multi-objective life cycle approach for optimal building design: A case study in Finnish context. **Journal of Cleaner Production**. 2017.

PEÑALOZA, D.; ERLANDSSON, M.; FALK, A. Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. 2019.

PIEROBON, F.; HUANG, M.; SIMONEN, K.; GANGULY, I. Environmental benefits of using hybrid CLT structure in midrise nonresidential construction: An LCA based comparative case study in the U.S. Pacific Northwest. **Journal of Building Engineering**. 2019.

PUETTMANN, M.; SINHA, A.; GANGULY, I. Life cycle energy and environmental impacts of *Cross Laminated Timber* made with coastal Douglas-fir. **Journal of Green Building**. 2019.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; *et al.* The wood from the trees: The use of timber in construction. Renewable and Sustainable **Energy Reviews**, 2017.

ROBERTSON, A. B.; LAM, F. C. F.; COLE, R. J. A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: laminated timber or reinforced concrete. **Buildings**. 2012

SALLES E PORTUGAL, R.; LAWRENCE, B.; LALEICKE, P. F.; SINHA, A. Technical note: a preliminary study to quantify the environmental impacts of concrete and cork flooring. **Wood and Fiber Science**. 2018.

SANTI, S.; PIEROBON, F.; CORRADINI, G.; CAVALLI, R.; ZANETTI, M. Massive wood material for sustainable building design: the Massiv-Holz-Mauer wall system. **Journal of Wood Science**. 2016.

SKULLESTAD, J. L.; BOHNE, R. A.; LOHNE, J. High-rise timber buildings as a climate change mitigation measure - a comparative lca of structural system alternatives. **Energy Procedia**. 2016.

TAKANO, A.; WINTER, S.; HUGHES, M.; LINKOSALMI, L. Comparison of life cycle assessment databases: a case study on building assessment. **Building and Environment**. 2014.

TETTEY, U. Y. A.; DODOO, A.; GUSTAVSSON, L. Effect of different frame materials on the primary energy use of a multi storey residential building in a life cycle perspective. **Energy and Buildings**. 2019.

URGE-VORSATZ, D.; PETRICHENKO, K.; STANIEC, M.; EOM, J. Energy use in buildings in a long-term perspective. **Curr. Opin. Electrochem**. 2013, 5, 141–151

VIDAL, R.; SÁNCHEZ-PANTOJA, N.; MARTÍNEZ, G. Life cycle assessment of a residential building with cross-laminated timber structure in Granada-Spain. **Informes de la Construcción**. 2019

ZEITZ, A.; GRIFFIN, C. T.; DUSICKA, P. Comparing the embodied carbon and energy of a mass timber structure system to typical steel and concrete alternatives for parking garages. **Energy & Buildings**. 2019

ZIGART, M.; LUKMAN, R.K.; PREMROV, M.; LESKOVAR, V. Z. Environmental impact assessment of building envelope components for low-rise building. **Energy**. 2018

4 CAPÍTULO IV: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CLT NO CONTEXTO BRASILEIRO

4.1 INTRODUÇÃO

Para atender às demandas de mitigação do aquecimento global, um possível caminho é o sequestro e armazenamento de carbono promovidos pelas florestas, bem como, o uso da biomassa produzida em substituição aos materiais de origem fóssil ou mineral (ALAM *et al.*, 2013). A aplicação da madeira para fins duráveis representa uma oportunidade para a fixação do carbono e pode contribuir mitigando o aquecimento global (HUNG *et al.*, 2009; RAMAGE *et al.*, 2017). O carbono sequestrado em produtos de madeira complementa o carbono estocado em florestas em um crescente armazenamento que só diminui no fim de vida útil dos produtos, quando o carbono volta para a biosfera pela deterioração do material (LIPPKE *et al.*, 2011). Contudo, aspectos do ciclo de vida como o manejo, a colheita e o uso de combustíveis fósseis e recursos energéticos, interferem no balanço de emissões oriundas destes processos em detrimento ao estoque por eles proporcionado (DOWAKI e MORI, 2005; PINGOUD *et al.*, 2010).

Os benefícios ambientais decorrentes do uso de produtos florestais – como a madeira serrada e seus derivados engenheirados - têm provocado o questionamento a respeito dos encargos ambientais que decorrem da sua produção em massa (KLEIN *et al.*, 2015). Observa-se que a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem muito a contribuir para a análise desta cadeia, pois, sendo uma ferramenta metodológica de gestão ambiental, realiza um balanço de todas as fases do ciclo de vida, quantificando e analisando todas as interações e emissões decorrentes da produção (HAUSCHILD *et al.*, 2017). Ainda que a madeira se diferencie positivamente em relação a seus produtos alternativos (BUCHANAN e LEVINE, 1999; MOLINA e CALIL, 2010; BERGMAN *et al.*, 2014; ARAÚJO *et al.*, 2016), esta cadeia deve ser continuamente avaliada e gerenciada com base em dados científicos gerados de forma normatizada.

O *Cross Laminated Timber* (CLT) é uma inovação construtiva recente que se espalhou pela Europa e pelo mundo nas últimas duas décadas. Trata-se de composto quase rígido de madeira engenheirada que se caracteriza por uma elevada estabilidade dimensional devido à disposição ortogonal de suas peças, sendo capaz

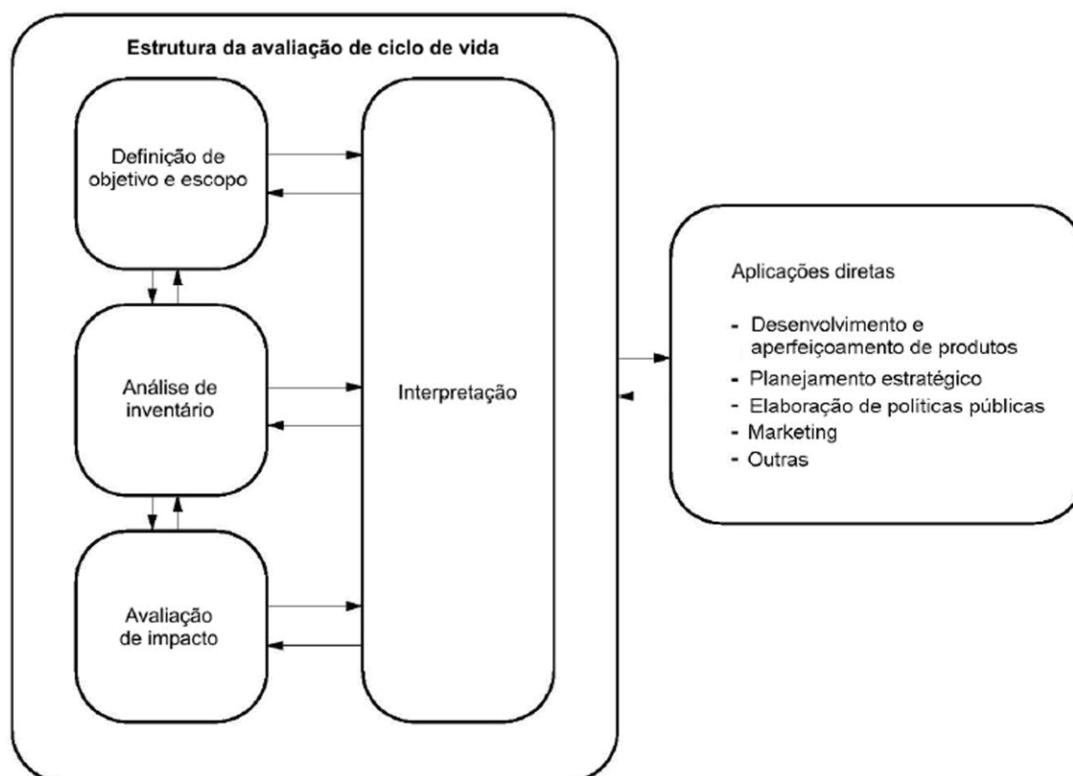
de suportar grandes cargas e, por isso, adquirir funções antes destinadas apenas ao aço e ao concreto armado (BRANDNER *et al.*, 2016).

Observou-se como lacuna científica da revisão sistemática, apresentada no capítulo 3 deste trabalho, a ausência de estudos brasileiros que abordassem a produção do material no país. Questões como o sequestro de carbono promovido pelo uso no painel e as emissões decorrentes da produção no Brasil não foram abordadas nos estudos. Logo este capítulo tem como objetivo analisar o perfil ambiental da cadeia produtiva do CLT em termos de consumo energético e potencial de aquecimento global. A escolha desses indicadores ambientais se deve à urgência em atender às demandas de mitigação do aquecimento global, cuja principal causa é o consumo energético e suas decorrentes emissões.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste estudo de Avaliação do Ciclo de Vida foram seguidas as normas NBR ISO 14040 e 14044 (2006). A ACV está regida internacionalmente pela Organização Internacional para Normalização (ISO) através das normas ISO 14040 e 14044 (ISO, 2006a; ISO, 2006b); e, no Brasil, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) com a ABNT NBR ISO 14040:2009, intitulada Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura; e a ABNT NBR ISO 14044:2009, intitulada Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. A estrutura metodológica estabelece quatro etapas: Definição do objetivo e do escopo; Inventário do Ciclo de Vida (ICV); Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV); e Interpretação dos Resultados (ABNT, 2009a; ABNT 2009b), que estão demonstradas na FIGURA 13 a seguir.

FIGURA 13 - ESTRUTURA METODOLÓGICA DA ACV



FONTE: ABNT (2009a)

4.2.1 OBJETIVO E ESCOPO

O objetivo deste estudo foi analisar o potencial de aquecimento global e consumo energético decorrente da produção de 1 m³ de painel CLT produzido no Brasil, dentro de uma fronteira do berço-ao-portão da fábrica, ou seja, desde a produção das matérias primas (berço) até a entrega do painel no portão da fábrica (portão).

O público-alvo a que se destina este estudo são os agentes da comunidade científica e do setor da construção civil interessados na sustentabilidade dos materiais e na possibilidade de mitigação do aquecimento global pelo uso da madeira, em especial do painel CLT.

4.2.2 DEFINIÇÕES DE ESCOPO

A produção do CLT, analisada neste trabalho, contempla a produção da madeira de Pinus, o tratamento da madeira e a produção dos painéis CLT, bem como os transportes dos insumos e produtos. Para melhor análise, a produção está dividida

em 4 subsistemas principais compostos de 1 ou mais Inventários do Ciclo de Vida (ICV) definidos como: Operações Florestais (OF); Produção da Madeira Serrada (PMS); Tratamento da Madeira Serrada (TMS); e Produção do CLT (PCLT). Os subsistemas e os respectivos ICVs encontram-se apresentados no QUADRO 2 com as seguintes definições metodológicas:

QUADRO 2 – SUBSISTEMAS, ICVs E SUAS DEFINIÇÕES

SUBSISTEMA	ICV	FRONTEIRA	UNIDADE DECLARADA	COBERTURA TEMPORAL	COBERTURA GEOGRÁFICA	EMPRESA
OF	Produção de Mudanças	berço-ao-portão	1600 mudas	12 meses	Estado do Paraná	A
	Plantio e Manutenção da Floresta	portão-ao-portão	1 hectare cultivado	12 meses	Estado do Paraná	A
	Colheita	portão-ao-portão	1 tonelada de tora verde com casca	12 meses	Estado do Paraná	A
PMS	Produção da Madeira Serrada	portão-ao-portão	1 tonelada (TU=0%)	12 meses	Estado do Paraná	B
TMS	Tratamento da Madeira Serrada	portão-ao-portão	1 tonelada (TU=0%)	12 meses	Estado do Paraná	C
PCLT	Produção do CLT	portão-ao-portão	1m ³	12 meses	Brasil*	D**

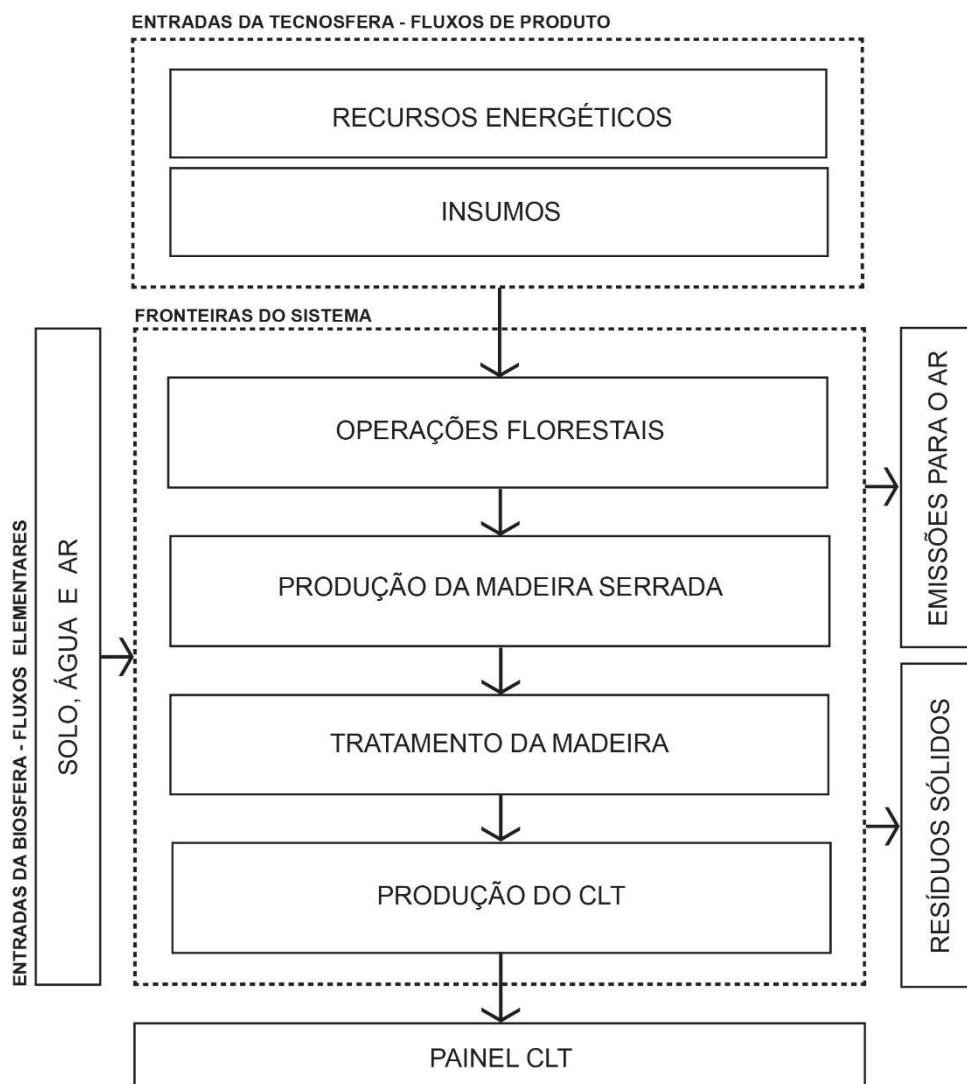
*Os dados deste ICV foram obtidos a partir um estudo internacional e adaptados para a realidade brasileira.

** Empresa fictícia.

FONTE: Autora (2021).

O sistema de produto completo analisado está representado de forma simplificada na FIGURA 14.

FIGURA 14 - FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE PRODUTO



FONTE: Autora (2021).

As **ENTRADAS** consideradas foram: matéria-prima, insumos e recursos energéticos. Convencionou-se neste estudo denominar como matéria-prima os materiais lenhosos que entram no processo, porém a produção do material lenhoso está dentro da fronteira deste estudo, logo, não aparece como entrada de produto. Foram denominados insumos os demais materiais utilizados na produção (diferentes de material lenhoso), e como recursos energéticos, todos recursos materiais transformados em algum tipo de energia (elétrica, térmica ou mecânica) utilizados no processo.

As **SAÍDAS** consideradas foram: produtos, resíduos sólidos e emissões para o ar (Gases do Efeito Estufa - GEE). Foram definidos como resíduos, as saídas de

material lenhoso diferentes do produto principal do ICV; e as emissões para o ar são as emissões de GEE oriundas do uso de recursos energéticos no processo.

Não foram considerados os processos de estabelecimento e manutenção de infraestrutura como os associados aos bens de capital (maquinário, meios de transporte, serras utilizadas no processo e outros equipamentos), e nem a entrada de recursos para consumo humano (água, transporte de trabalhadores). Também não foram reportadas entradas referentes à embalagem do produto e nem os resíduos líquidos do processo. Um resumo das inclusões e exclusões das fronteiras do sistema está indicado no QUADRO 3.

QUADRO 3 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A DEFINIÇÃO DAS FRONTEIRAS

INCLUSOS	EXCLUSOS
Matéria-prima, insumos, água e recursos energéticos consumidos na produção.	Bens de capital (máquinas e recursos fixos), instalações, resíduos líquidos e recursos para consumo humano (água, alimento, transporte de trabalhadores).

FONTE: Autora (2021).

Na cadeia produtiva da madeira é comum a necessidade de algum procedimento de alocação, tendo em vista a geração de diferentes coprodutos lenhosos durante o processo produtivo. Quando necessário, este trabalho apresenta resultados com base em alocações em termos físicos (volume ou massa) descritos em cada inventário.

4.2.3 DESCRIÇÃO DO PRODUTO

O produto objeto deste estudo é o painel estrutural CLT feito com madeira de *Pinus taeda* seca em estufa com teor de umidade 12% (+/-2%) tratada em autoclave com Borato de Cobre Cromatado (CCB) e colada com adesivo monocomponente à base de poliuretano (PUR). Os painéis podem ter 3, 5 ou 7 lamelas, variando de 57mm à 250mm de espessura² com densidade de 550 kg/m³.

² O produto foi definido a partir da descrição da Crosslam (2021), que no período desta pesquisa, era a única produção brasileira, portanto, este produto foi adotado como o perfil de CLT produzido no Brasil.

4.2.4 DESCRIÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA

A cadeia produtiva deste estudo está dividida em 4 subsistemas descritos nos tópicos a seguir.

4.2.4.1 Operações Florestais

A empresa A emprega a estratégia de manejo com poda e desbaste em suas florestas, sendo que a descrição a seguir se refere às atividades executadas em suas fazendas de produção florestal. Este ICV inclui todas as atividades realizadas na floresta para obter a principal matéria-prima da cadeia produtiva em questão - toras de madeira. As sementes são obtidas por compra de terceiros, sendo que a germinação delas ocorre em tubetes de plástico preenchidos com substrato. Este substrato consiste em uma mistura de casca de Pinus, vermiculita, adubo e fungicida. O substrato é preparado em uma betoneira e disposto nos tubetes, que são submetidos à compactação em uma mesa vibratória, para então receber a semente. Os tubetes semeados seguem para a casa de germinação, onde ficam dispostos em mesas e recebem irrigação mecânica por um aspersor em ambiente com temperatura controlada, semelhante a uma estufa.

FIGURA 15 - GERMINAÇÃO NO TUBETE E DESENVOLVIMENTO



FONTE: RBFLORESTAL (2021).

Na sequência, as mudas germinadas seguem para o pátio de rustificação, onde ficam dispostas em mesas protegidas por um sombrite antigranizo, onde também recebem irrigação mecânica por um aspersor. Após este período, as mudas estão prontas para o plantio e são retiradas dos tubetes. Em seguida, as mudas são dispostas em uma lona, em um processo denominado rocambolagem, para então, serem transportadas ao campo para plantio.

FIGURA 16 – RUSTIFICAÇÃO E MUDAS PRONTAS PARA O TRANSPORTE



FONTE: Autora (2019).

A etapa preparação do solo ocorre antes do plantio e inclui a aplicação de fertilizantes, herbicida e formicida. O plantio de mudas é realizado na empresa de forma manual, por meio da abertura e inserção no solo. Até 3 meses após o plantio, pode ocorrer o replantio, também manual, em caso de mudas que não se desenvolveram.

FIGURA 17 - PREPARAÇÃO DO SOLO E PLANTIO



FONTE: Grupo As Resinas (2021).

Após o plantio, procede-se à fase de condução da floresta que envolve as atividades de roçada, poda, combate a pragas e desbaste. As roçadas ocorrem principalmente até o quarto ano após o plantio, duas vezes ao ano, sendo uma química (herbicida Scout) outra, manual. As podas são realizadas 3 vezes, com o uso de ferramentas como foice e serrote de poda, nas idades de 2,5 anos (1,7 m de altura), de 4 anos (2,8 m de altura) e de 5 anos (3,8 m de altura). O controle de pragas envolve principalmente o combate às formigas com isca formicida (Mirex-S). Os desbastes

ocorrem 3 vezes com a floresta em idade de 12 anos, de 16-18 anos, e mais que 25 anos.

FIGURA 18 - MANUTENÇÃO E DESBASTE



FONTE: Materioteca UFSC (2021)

A etapa de colheita da madeira envolve as atividades de corte das árvores e remoção de toras da floresta. O corte tanto na colheita como no desbaste é quase totalmente feito por máquinas *Harvesters*, que processam as árvores em toras e toretes, organizando-os em feixes. O baldeamento da madeira até os caminhões de transporte ou então para locais de armazenamento é feito por equipamentos chamados *Forwarders*.

FIGURA 19 - CORTE RASO



FONTE: EMBRAPA (2021)

4.2.4.2 Produção da Madeira Serrada

A empresa B produz madeira serrada de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, e processa madeira oriunda de florestas próprias ou adquiridas de terceiros. A PMS inicia-se com o recebimento dos caminhões (capacidade de 15 a 40 t.) no pátio de toras, onde uma grua móvel executa o descarregamento das toras e organiza o estoque para que a matéria-prima seja utilizada por meio do sistema FIFO (first-in-first-out). Em seguida, por meio de uma grua móvel, a grua fixa é abastecida e transfere as toras para a linha de produção. Ocorre no início da linha de produção o processo de descascamento, cuja biomassa proveniente é direcionada para a usina termelétrica que produz eletricidade e vapor. Parte do vapor produzido nesta usina é posteriormente aproveitado nas estufas no processo de secagem da madeira.

FIGURA 20 - INÍCIO DO PROCESSAMENTO DAS TORAS



FONTE: Autora (2019).

Após o descascamento, as toras são transformadas em peças de seção retangular, este processo está dividido em duas etapas: desdobro primário e secundário.

O desdobro primário inicia-se pelo corte da tora em um bloco central e tábuas laterais por meio de serras circulares. O desdobro secundário do bloco central e das tábuas laterais ocorre em processos paralelos e simultâneos (refilagem/resserra) por

múltiplas serras circulares. O desdobro secundário do bloco central - oriundo do desdobro primário - divide o bloco em tábuas laterais e medula central por meio de serras circulares. As tábuas refiladas e a medula central são direcionadas para a resserra e as tábuas e os blocos resultantes são direcionados para a classificação.

FIGURA 21 - DESDOBRIO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO



FONTE: Autora (2019)

Após a refilagem e resserra, as tábuas passam pelo processo de destopo - que se refere ao corte das peças no comprimento. Posteriormente, são classificadas por tamanho. Após a classificação, as peças são direcionadas por meio de esteiras automatizadas para compartimentos que as organizam de acordo com suas características dimensionais e qualidade.

FIGURA 22 - CLASSIFICAÇÃO DAS PEÇAS



FONTE: Autora (2019)

As peças classificadas são tabicadas e dispostas em grades e direcionadas para o pátio de armazenamento de madeira verde ou para as estufas de secagem.

FIGURA 23 - PEÇAS TABICADAS PARA SEREM DESTINADAS À ESTUFA DE SECAGEM



FONTE: Autora (2019)

O início do processo de secagem em estufas envolve a umidificação da madeira para uniformização da umidade do lote a ser seco. A secagem da madeira ocorre por meio da circulação do vapor quente proveniente das caldeiras, realizada por ventiladores que distribuem o ar quente de modo a garantir as condições de secagem. A energia térmica utilizada no processo é proveniente da usina termelétrica, abastecida com biomassa (casca, serragem etc.) própria e de fornecedores externos.

FIGURA 24 - ESTUFA DE SECAGEM



FONTE: Autora (2019)

Após a secagem, os fardos com as tábuas são degradeados e a madeira serrada é encaminhada para o beneficiamento. Na remanufatura ocorre nova classificação - visual e dimensional. Então, as tábuas são encaminhadas para um novo destopo para padronizar o comprimento e eventualmente aplainamento para padronizar a espessura. Após esses processos a madeira serrada segue para nova classificação dimensional e de qualidade. Finalmente, as peças são organizadas em fardos que podem ser encaminhados para a expedição (saída do produto da fábrica).

FIGURA 25 - PEÇAS ORGANIZADAS EM FARDOS PARA EXPEDIÇÃO



FONTE: Autora (2019)

4.2.4.3 Tratamento da Madeira

As atividades na indústria C iniciam-se com o descarregamento da madeira serrada e armazenamento das peças em galpão. Caso as peças estejam com teor de umidade superior a 20% (b.s.) são submetidas à uma pré-secagem em estufa a vapor.

As peças de madeira serrada são transportadas até a autoclave, então a câmara é abastecida e fechada. As peças são submetidas ao vácuo e imersas na solução de Borato de Cobre Cromatado (CCB). Ainda imersas, as peças do gênero *Pinus spp* sofrem pressão de até 12 kg/cm² e assim permanecem por cerca de 5

minutos. Em seguida, retira-se a pressão, e a solução preservante excedente é drenada da câmara, retornando para o reservatório. As peças são submetidas ao vácuo novamente com o objetivo de retirar o excesso de solução na madeira. Toda a solução preservante que não impregnou é armazenada e reutilizada em novo processo, sendo este processo um ciclo fechado. O tratamento completo de uma batelada tem duração aproximada de uma hora e meia. Após o ciclo de tratamento em autoclave, a madeira serrada tratada úmida (TU= 80% b.s.) é levada para um pátio de armazenamento e passa por uma cura de 3 a 10 dias, para então ser destinada à ressecagem.

FIGURA 26 - ENTRADA DE PEÇAS PARA TRATAMENTO NA AUTOCLAVE



FONTE: Autora (2019)

A secagem da madeira é feita pela empresa parceira de duas formas 1) em sistema de fornalha próprio com aproveitamento de biomassa residual do processo (serragem) e biomassa comprada de terceiros (aproximadamente 87% no ano de 2019); 2) secagem em madeireira externa (aproximadamente 13% no ano de 2019). No segundo caso, um caminhão transporta a madeira tratada úmida até a madeireira parceira, localizada a 2,5 km. A madeira é seca em estufa a um teor de umidade de aproximadamente 15% (b.s.).

Após a secagem, pode ocorrer o aplainamento, contudo, apenas 5% da madeira produzida na indústria passa por esse processo após tratamento, já que a maior parte da matéria-prima é recebida aplainada. Após todos esses processos a madeira é destinada à expedição.

FIGURA 27 - ESTUFA DE SECAGEM ABASTECIDA POR CALDEIRA



FONTE: Autora (2019)

FIGURA 28 - PEÇAS TRATADAS E SECAS PRONTAS PARA EXPEDIÇÃO



FONTE: Autora (2019)

Serragem, aparas, seções de destopo, além de partículas ou peças rejeitadas são queimadas na fornalha para a geração de calor utilizado no processo de secagem. Além do calor gerado a partir da queima de biomassa residual, as demais fontes energéticas utilizadas no processo de tratamento em autoclave são eletricidade, diesel e gás liquefeito de petróleo (GLP). A eletricidade é consumida na autoclave e plaina, e é totalmente atendida pela rede de eletricidade integrada nacional. O diesel é utilizado na pá-carregadeira e o GLP é usado para operação de empilhadeiras nos diversos transportes internos de logística e produção.

A água utilizada no processo de secagem é totalmente proveniente da concessionária. No tratamento em autoclave, 15% são provenientes de aproveitamento da água de chuva e o restante é suprido por água da concessionária.

4.2.4.4 Produção do CLT

Na empresa D³ as peças selecionadas devem estar secas e possuir teor de umidade de aproximadamente 12%, adequado para a melhor aderência, evitando defeitos como fendas e variações dimensionais. Primeiramente, é realizada uma minuciosa classificação visual para detecção de defeitos (ex: nós soltos, desvios, entre outros). Os defeitos são removidos em equipamentos de otimização que utilizam sensores e serra circular automatizadas para este processo a fim de garantir a qualidade do painel CLT a ser produzido.

FIGURA 29 - SELEÇÃO DE PEÇAS, UNIÃO FINGER JOINT E CORTE



FONTE: Crosslam (2021)

Após a seleção, as lamelas são emendadas no topo por ligações *finger joint*, e depois, são montadas com a colocação das peças lado-a-lado até atingir o tamanho desejado. As camadas de lamelas são sobrepostas perpendicularmente umas às outras, e são pulverizadas por adesivo. O adesivo estrutural utilizado é o adesivo monocomponente à base de Poliuretano. Os painéis podem ter 3, 5 ou 7 camadas variando a espessura entre 57 e 250 mm, com dimensões mínimas de 2,44 m de largura por 8,55 m de comprimento, e máximas de 3 m de largura por 12 m de

³ Descrição da produção coletada em visita à Crosslam no ano de 2019 e disponibilizada pela empresa em seu site. Esta análise não possui dados primários desta empresa.

comprimento. Os painéis montados são submetidos a uma prensa de infusão a vácuo sob pressão de cerca de 400 toneladas. Depois de prensados, são cortados e finalizados em uma *router Computer Numeric Control (CNC)*, dotado de 3 cabeçotes e 5 eixos, capaz de realizar diferentes operações de usinagem, principalmente cortes e fresagens nas dimensões e formatos especificados no projeto.

FIGURA 30 - DISPOSIÇÃO DAS PEÇAS EM CAMADAS, COLAGEM E USINAGEM



FONTE: Crosslam (2021)

FIGURA 31 - PAINEL PRONTO PARA EXPEDIÇÃO



FONTE: Crosslam (2021)

4.2.5 PROCEDIMENTO DE COLETA

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram coletados dados primários e secundários. Foi possível coletar dados primários para os subsistemas OF, PMS e TM. Para o subsistema PCLT, foram utilizados dados secundários.

Parte dos dados utilizados neste trabalho vieram do projeto intitulado Construção do Inventário do Ciclo de Vida do Sistema construtivo Wood Frame, que foi contemplado pela Chamada MCTIC/CNPq Nº 40/2018 e apoiado pelo CNPq; Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTIC) e Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT). Este projeto teve a finalidade de alimentar o banco de dados nacional de inventários do ciclo de vida - SICV Brasil com dados do ciclo de vida primários para realidade brasileira. Deste trabalho, do qual a autora desta dissertação foi autora e integrante da equipe de pesquisa, se originam os dados referentes aos subsistemas OF; PMS; e TMS. Os dados da produção do CLT foram calculados a partir de um estudo internacional e será posteriormente apresentado.

4.2.5.1 DADOS PRIMÁRIOS

Todos os dados de insumos e emissões associados à produção nos ICVs de dados primários (OF, PMS, TM) foram obtidos a partir de questionários, entrevistas, consultas à especialistas da indústria, ou foram calculados com base em critérios indicados no tópico procedimento de cálculo.

A coleta de dados seguiu o seguinte protocolo:

- 1) Estabelecimento de parceria com as empresas

Foram feitas visitas às empresas parceiras e solicitada a disponibilização de dados qualitativos e quantitativos dos processos, bem como, o acesso às áreas produtivas.

- 2) Conhecimento detalhado do processo produtivo

Um especialista da empresa apresentou o processo produtivo durante visita técnica à planta industrial. Neste momento, informações de caráter qualitativo foram coletadas para posterior desenvolvimento do instrumento de coleta de dados.

- 3) Elaboração de instrumento de coleta e envio para a empresa;

Com base nas informações coletadas na visita técnica, foi elaborado um questionário para coleta das informações pertinentes a cada processo produtivo inventariado. O apêndice 01 apresenta o modelo desenvolvido.

4) Recebimento dos dados e interlocução com os especialistas;

Etapa em que foi feita a organização e análise prévia do conjunto de dados recebido. Observou-se fatores como: as informações faltantes, a sazonalidade dos dados ao longo da cobertura temporal, a coerência entre os fluxos de entrada e saída. Caso necessário, os interlocutores das empresas eram contactados para esclarecimentos.

5) Tratamento dos dados e procedimentos de cálculo;

Etapa em que foram feitos os cálculos das emissões e a distribuição dos fluxos para as unidades declaradas definidas para cada ICV. Os procedimentos de cálculo encontram-se descritos neste trabalho.

4.2.5.2 DADOS SECUNDÁRIOS

O ICV que corresponde à produção do CLT possui estimativas materiais retiradas do relatório realizado pelo *Consortium for Research on Renewable Industrial Materials* (CORRIM) intitulado *Life Cycle Assessment of Cross Laminated Timber Produced in Oregon* (PUETTMANN; SINHA; GANGULY, 2018). A produção inventariada no estudo citado, está localizada em Oregon nos Estados Unidos e a pesquisa seguiu os padrões das NBR ISO 14040/14044 (ABNT, 2009). A coleta realizada pelo CORRIM data de 2016 e a serraria possuía uma capacidade produtiva anual de 3398,02 m³ de painel estrutural.

Foram utilizados dados internacionais em decorrência da única empresa brasileira produtora de CLT ativa no período desta pesquisa ter se recusado a participar do estudo. Para que esses dados tivessem maior relevância para o contexto brasileiro, os fluxos de madeira e emissões associadas ao consumo de recursos energéticos foram adaptados para a realidade brasileira. Os procedimentos de cálculo utilizados encontram-se demonstrados no tópico a seguir.

4.2.6 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

A construção dos inventários que compõem esta pesquisa seguiu um procedimento de cálculo padrão. Para todos os ICVs, foram fornecidos dados para uma cobertura temporal de 12 meses de fluxos de entrada e saída dos sistemas, diminuindo a influência de eventuais sazonalidades dos processos produtivos ao longo de um ano. Esses dados foram utilizados para distribuir os fluxos para as

unidades declaradas definidas em cada ICV. O procedimento de cálculo está dividido em quatro tópicos apresentados a seguir.

4.2.6.1 Conversão dos fluxos de madeira em massa

A madeira, por ser um material higroscópico, apresenta durante todo o seu processamento grande variação no teor de umidade, o que reflete diretamente na variação de massa e densidade reportadas ao longo do seu ciclo de vida. Uma árvore é muito rica em água quando está viva. Quando é colhida, o seu teor de umidade (TU) pode variar entre 50 a 60% em base de massa úmida (b.u.) (FOELKEL, 2016).

Neste estudo, assumiu-se o teor de umidade de 60% para entrada de toras verdes nas serrarias. O teor de umidade das saídas de madeira serrada seca e de todos os coprodutos que também passaram pelo processo de secagem em estufa é de 12-15% base de massa seca (b.s.) de acordo com informação das empresas para o *Pinus elliottii* com densidade em torno de 480kg/m³ (IPT, 2020).

Em todos os ICVs deste estudo, a fim de facilitar o cálculo do balanço de massa, as entradas e saídas da madeira foram transformadas para massa seca (TU= 0%). As cascas, cavaco verde e a serragem verde têm umidade muito variável, portanto, a massa seca desses coprodutos foi calculada a partir da equação da densidade básica (equação 1), adotando-se a densidade básica do Pinus igual a 400 kg/m³ (IPT, 2020). As entradas de toras verde nas serrarias também foram transformadas em massa seca pela equação da densidade básica. As demais conversões de massa de material lenhoso foram feitas a partir da relação de teor de umidade (base seca ou úmida), a partir das Equações 2 e 3.

- Densidade básica

$$D_{básica} = \frac{ms}{V_{verde}} \quad (1)$$

- Teor de umidade (base seca)

$$TU_{base\ seca} = \frac{(mu - ms)}{ms} \cdot 100 \quad (2)$$

- Teor de umidade (base úmida)

$$(3)$$

$$TU_{base\ úmida} = \frac{(mu - ms)}{mu} \cdot 100$$

Em que:

TU = teor de umidade (%)

mu = massa úmida de madeira

ms = massa seca de madeira a 0% de umidade

Vverde = volume de madeira verde com umidade acima do ponto de saturação das fibras.

4.2.6.2 Conversão de energia térmica proveniente de biomassa

Alguns processos inventariados têm como fonte energética a energia térmica proveniente da queima de biomassa: Produção de madeira serrada e Tratamento preservativo da madeira serrada.

Para o cálculo da demanda por energia térmica proveniente de biomassa nos processos inventariados, foram coletadas as entradas de biomassa na caldeira e usina das empresas parceiras, geralmente reportados em m³ estéreo de biomassa úmida ou tonelada de biomassa úmida. Nas situações em que as entradas de biomassa para produção de energia térmica foram reportadas em m³ estéreo, o fator de 0,36 (KOFMAN, 2010) foi utilizado para a conversão de volume estéreo para volume sólido de biomassa.

Para as entradas de biomassa úmida na caldeira ou usina, adotou-se um teor de umidade de 40% em base seca, por ser uma média reportada pelas empresas B e C. Calculou-se a energia térmica a partir da massa úmida de biomassa e do poder calorífico útil da queima de biomassa úmida, a partir da Equação 4. Adotou-se como poder calorífico útil (PCU) o valor de 3100 kcal/kg (EPE, 2020).

$$ET = mu \cdot PCU \cdot 0,004184 \text{ MJ/kcal} \quad (4)$$

ET = energia térmica (MJ)

mu = massa úmida de madeira (kg)

PCU = poder calorífico útil na umidade considerada para o material (kcal)

0,004184 MJ/kcal = conversão de unidade de kcal para MJ

4.2.6.3 Cálculo de emissões associadas à combustão

As emissões associadas à combustão do diesel, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), gasolina, lubrificantes em máquinas foram retirados de IPCC (2006b), IPCC (2006c) e Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2014). As emissões associadas à combustão de biomassa para produção de energia foram obtidas de MCTIC (2016) e

IPCC (2006b). As emissões associadas às atividades de transporte foram retiradas de MMA (2014).

De acordo com IPCC (2006a) as emissões de dióxido de carbono (CO_2) são independentes da tecnologia de combustão, enquanto as emissões de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) são fortemente dependentes da tecnologia, e consequentemente do setor de origem da combustão. Dessa forma, o IPCC reporta as emissões de CO_2 , CH_4 , e N_2O em dois capítulos distintos: um direcionado a emissões estacionárias (IPCC, 2006b) e outro a emissões móveis (IPCC, 2006c).

Neste trabalho também se adota essa divisão, sendo que as fontes de combustão estacionária se referem à combustão em equipamentos estáticos, como caldeiras. Já as emissões móveis se referem às emissões de transporte de insumos (ex: rodoviário e marítimo), e aquelas provenientes da combustão em equipamentos móveis dentro dos processos produtivos (ex: equipamentos florestais, motosserras, empilhadeiras, guas entre outras máquinas móveis).

I) Combustão estacionária

a) Produção de energia térmica proveniente da queima de biomassa

Para o cálculo das emissões associadas à energia térmica proveniente de biomassa, foram coletadas as entradas de biomassa na caldeira/usina. As emissões GEE foram calculadas com base nos fatores apresentados no QUADRO 4 a seguir:

QUADRO 4 - FATORES DE EMISSÃO DE CO_2 , CH_4 E N_2O POR QUEIMA DE BIOMASSA DE MADEIRA PARA ENERGIA NAS INDÚSTRIAS.

COMBUSTÍVEL	UNIDADE	FATORES DE EMISSÃO (kg de GEE/unidade)		
		CO_2	CH_4	N_2O
Biomassa	tonelada	1833 ^b	0,543 ^{a, b, c}	0,0724 ^{a, b, c}

^(a) MCTIC (2016); ^(b) GHG (2020); ^(c) IPCC⁴ (2006b)

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

⁴ (c) são utilizados os fatores de emissão padrão por fonte energética associados à combustão estacionária em indústrias de manufatura e construção (IPCC, 2006b, Tabela 2.3).

As emissões associadas à queima de biomassa oriunda de florestas plantadas para geração de energia térmica foram consideradas nulas em emissão fóssil e, portanto, reportadas como emissões biogênicas nos ICVs (GHG, 2015).

b) Emissões associadas à produção de energia elétrica no sistema interligado nacional do Brasil

A matriz energética da rede interligada brasileira é composta por fontes não renováveis e renováveis que são convertidas em eletricidade. Dentre as fontes não renováveis estão o carvão mineral, os derivados de petróleo e o gás natural; e entre as fontes renováveis, a energia hidráulica, eólica, solar e da biomassa. Além dessas, há também a participação da energia nuclear, que está contida no núcleo do isótopo instável de urânio (U235), que é um recurso mineral encontrado em baixíssimas concentrações na crosta terrestre e, portanto, não se encaixa nessas categorias.

A conversão da energia fóssil por meio da combustão para gerar eletricidade libera gases, entre eles o CO₂, CH₄ e N₂O. Tais emissões decorrentes da queima de combustíveis fósseis podem ser estimadas por meio de fatores de emissão como os reportados pelo IPCC. O fato é que nem todo o calor de combustão se transforma em eletricidade, parte dele é perdido para o ambiente e, portanto, cada fonte está associada a uma eficiência/rendimento médio que representa a conversão da energia primária em eletricidade.

Para o desenvolvimento deste inventário, fatores de emissão de CO₂, CH₄ e N₂O atribuídos à produção da eletricidade brasileira em 2019 foram estimados, conforme indicado no QUADRO 55.

QUADRO 5 - FATORES DE EMISSÃO DE CO₂, CH₄ E N₂O POR FONTES PRIMÁRIAS PARA A GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NO BRASIL EM 2019.

Fonte de energia (fóssil)	Participação na Matriz Brasileira	Rend. médio	Fator de eficiência de conversão	%	Fatores de Emissão (kg de GEE/GJ de fonte)			Fator de emissão atribuído à geração de eletricidade brasileira (kg de GEE/GJ de eletricidade)		
					CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Carvão	3,3 ^a	0,32 ^b	3,1	10,3	94,6 ^c	0,001 ^c	0,015 ^c	9,76	0,00010	0,00015
Derivados de petróleo	2 ^a	0,434 ^a	2,3	4,6	74,1 ^c	0,003 ^c	0,0006 ^c	3,41	0,00014	0,00003
Gás Natural	9,3 ^a	0,56 ^b	1,8	16,6	56,1 ^c	0,001 ^c	0,0001 ^c	9,32	0,00017	0,00002

TOTAL	22,49	0,0004	0,0002
-------	-------	--------	--------

FONTE: Tavares *et al.* (2021)

(a) Adotado o rendimento médio do óleo diesel (EPE, 2020, pág. 203)

(b) Adotado o rendimento médio mundial para a geração de energia a partir de carvão mineral (EPE, 2016, pág. 315); adotado o rendimento médio para termelétricas a gás operando em ciclo combinado (EPE, 2016, pág. 93);

(c) são utilizados os fatores de emissão padrão por fonte energética associados à combustão estacionária na indústria de energia (IPCC, 2006a, Tabela 2.2).

O cálculo desses fatores foi baseado nas participações das fontes fósseis na matriz de eletricidade brasileira para o ano de 2019, obtidas no Balanço Energético Nacional (EPE, 2020); no rendimento médio, ou seja, eficiência da conversão das fontes primárias em energia elétrica (EPE, 2020; EPE, 2016); e em fatores de emissão padrão por fonte energética associados à combustão estacionária na indústria de energia (IPCC, 2006b).

Em termos de cálculos, o rendimento médio é utilizado para obter um fator de eficiência de conversão das fontes. A participação das fontes na matriz energética brasileira é então multiplicada por esse fator de eficiência calculado, obtendo-se um fator de ponderação que é multiplicado pelos fatores de emissão de cada GEE. Por fim, as contribuições de cada fonte são somadas, obtendo-se fatores de emissão de GEE para a geração da eletricidade brasileira. As participações das fontes renováveis de energia como hídrica, eólica, solar, nuclear, além da biomassa são consideradas nulas em emissão fóssil.

II) Combustão Móvel

a) Equipamentos industriais

As emissões associadas ao consumo de combustíveis fósseis em fontes móveis (ex: equipamentos florestais, motosserra, guas, carregadeira e empilhadeiras) dentro do processo produtivo foram calculadas com base em fatores do IPCC (2006b), indicados no QUADRO 6.

QUADRO 6 - FATORES DE EMISSÃO DE CO₂, CH₄ E N₂O POR COMBUSTÃO MÓVEL NAS INDÚSTRIAS.

COMBUSTÍVEL	UNIDADE	FATORES DE EMISSÃO (kg de GEE/unidade)		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Diesel	litros	2,603 ^a	0,00014 ^b	0,00014 ^b
Gasolina automotiva	litros	2,212 ^a	0,00081 ^b	0,00026 ^b
Gás Liquefeito de Petróleo	kg	2,932 ^b	0,00288 ^b	0,00001 ^b
Biodiesel	litros	2,431 ^a	0,0003 ^c	0,00002 ^c
Etanol Anidro	litros	1,526 ^a	0,0002 ^c	0,00001 ^c
Lubrificantes – usados nos setores de manufatura e construção	litros	2,718 ^c	0,00011 ^c	0,000022 ^c
Lubrificantes – usados nos setores residencial, agricultura, florestal e pesca	litros	2,718 ^c	0,00037 ^c	0,000022 ^c

(a) MMA (2014); (b) IPCC (2006c); (c) IPCC (2006b).

FONTE: Tavares et al. (2021)

b) Transportes

Neste trabalho considerou-se dois tipos de caminhão: os de porte médio com peso total entre 10 e 15 toneladas; e os de porte pesado, com peso total entre 15 e 40 toneladas. As emissões atmosféricas consideradas neste trabalho foram monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), emissões evaporativas (NMHC - *nonmethane hydrocarbons*), material particulado (MP), metano (CH₄). As emissões de transporte foram calculadas com base nos fatores de emissão reportados no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 (MMA, 2013), indicados no QUADRO 7:

QUADRO 7 - FATORES MÉDIOS DE CONSUMO DE DIESEL E DE EMISSÃO DE POLUENTES POR CAMINHÕES NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO BRASILEIRO- FORNECIDOS PELO PROGRAMA DE CONTROLE DE EMISSÕES VEICULARES (PROCONVE) - FROTAS 2000-2012

CLASSIFICAÇÃO DO VEÍCULO	COMBUSTÍVEL	km/l	EMISSIONES (gramas de poluente/km)				
			CO	NO _x	NMHC	MP	CH ₄
Caminhões médios (PBT ≥ 10 t. < 15 t.)	Diesel	5,6	0,560	3,299	0,146	0,079	0,060
Caminhões pesados (PBT ≥ 15 t.; PBTC ≥ 40 t.)	Diesel	3,4	0,875	5,289	0,228	0,118	0,060

Fonte: MMA (2013) adaptado pela autora

A composição dos combustíveis foi adaptada para realidade brasileira, considerando a proporção 11% de biodiesel no diesel (ANP, 2020) e de 27% de etanol anidro na gasolina (MAPA, 2015) comercializados no país no ano de 2019, sendo contabilizadas as emissões biogênicas associadas e reportadas separadamente para maior transparência dos resultados.

O cálculo de emissões de transporte marítimo foi feito com base nos Fatores de Conversão do Governo do Reino Unido para GEE (DEFRA, 2019) e, para o insumo importado (resina melamínica) por este modal, assumiu-se que as atividades de transporte foram realizadas por um navio de carga geral médio, cujos fatores de emissão estão indicados no QUADRO 8.

QUADRO 8 - FATORES DE EMISSÃO DE CO₂, CH₄ E N₂O PARA TRANSPORTE MARÍTIMO.

NAVIO CARGUEIRO	FATOR DE EMISSÃO (kg GEE/ tkm)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Navio de carga geral - médio	0,013	0,000004	0,000180

FONTE: GHG Brasil (2020); DEFRA (2019)) adaptado pela autora

Considerou-se que o transporte de materiais lenhosos foi feito por caminhões pesados, com carga útil entre 15 e 40 toneladas. Esta definição foi baseada no histórico das cargas de entradas de tora nas serrarias que giram em torno de 20-50 toneladas. O transporte dos demais insumos ficou definido como sendo feito por caminhões médios, com carga útil entre 10 e 15 toneladas. Os fatores de consumo de combustíveis e emissões característicos da frota brasileira foram obtidos a partir do 3º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013, ano base 2012 (MMA, 2013), que no momento do desenvolvimento deste trabalho, era a publicação mais recente para realidade brasileira.

III) Emissões associadas à mudança de uso do solo

A metodologia do Guia de Boa Prática para Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (IPCC, 2003) estabelece que as estimativas das emissões de CO₂ em um determinado período é realizada por meio da avaliação da diferença de estoques de carbono entre o início e o final do período para diferentes tipos de transições. De acordo com este documento, o ganho ou perda de carbono no solo resultante da mudança no uso da terra ocorre durante um período de 20 anos,

quantidade de tempo necessária para que o carbono armazenado no solo atinja o equilíbrio (IPCC, 2003).

Para o tipo de transição Reflorestamento permanecendo Reflorestamento (Ref-Ref), assume-se que, em média, a mudança de estoque de carbono é nula (IPCC, 2003; MCTIC, 2015).

Para as florestas plantadas inventariadas neste projeto, a conversão do uso do solo para áreas de reflorestamento ocorreu há um período maior que 20 anos contados a partir do desenvolvimento deste ICV, logo, as emissões associadas à mudança do uso do solo foram consideradas nulas.

4.2.6.4 Avaliação do ciclo Vida – Cálculo do Potencial de Aquecimento Global

A avaliação do impacto do ciclo de vida dos itens dos inventários foi realizada utilizando o banco de dados IMPACT World+ e o programa de código aberto OpenLCA 1.10.4. O potencial de aquecimento global (GWP) foi avaliado por meio do método IMPACT World+ (*Continental Latin America - midpoint 1.251*) em um horizonte de tempo de 100 anos (*short term*). Este método é globalmente regionalizado e tem como objetivo abordar a incerteza do impacto relacionada à variabilidade espacial, sendo o método selecionado adaptado para América Latina (BULLE *et al.*, 2019).

Foi adotada uma abordagem conservadora na alocação de impactos nos coprodutos desta cadeia produtiva, e os resultados foram atribuídos inteiramente ao produto principal nos subsistemas OF, PMS e PCLT. Nestes processos as cargas ambientais não foram alocadas por massa ou valor econômico, por se tratar de processos industriais cujos coprodutos são de baixo valor agregado em relação ao produto principal. Os coprodutos resultantes desses processos são consumidos como recurso energético dentro da fábrica. Logo, a alocação dos impactos para esses coprodutos/resíduos lenhosos subestimaria os reais impactos do produto principal. Em TMS, as entradas agregadas foram atribuídas ao produto de interesse por meios de alocação por massa, já que a empresa trata diferentes madeiras e produtos com valor agregado igual ou maior que o produto de interesse. Logo, foi necessário que os impactos fossem distribuídos entre os diferentes produtos e coprodutos neste subsistema.

4.3 RESULTADOS

Os resultados estão apresentados primeiramente pelos ICVs que compõe a cadeia produtiva, separados por subsistemas, e depois, pelos resultados de potencial de aquecimento global e consumo de recursos energéticos de todas as etapas do ciclo de vida abordadas pelo estudo.

4.3.1 OPERAÇÕES FLORESTAIS

O subsistema Operações Florestais é composto por 3 ICVs (FIGURA 32) denominados Produção de mudas, Plantio e Manutenção da Floresta e Colheita, cujos resultados encontra-se apresentados separadamente nos tópicos a seguir.

FIGURA 32 - FLUXOGRAMA DO SUBSISTEMA OPERAÇÕES FLORESTAIS

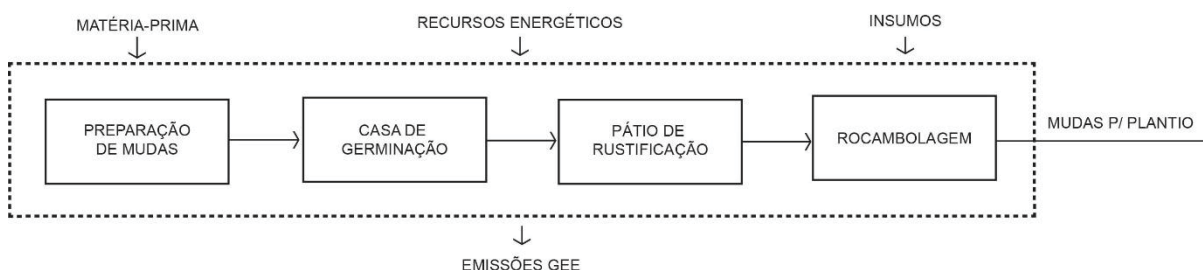


FONTE: Autora (2019)

4.3.1.1 Produção de mudas

O ICV denominado Produção de mudas contempla as atividades denominadas como preparação de mudas, casa de germinação, pátio de rustificação e rocambolagem, e está apresentado esquematicamente na FIGURA 33.

FIGURA 33 - FLUXOGRAMA ICV PRODUÇÃO DE MUDAS



FONTE: Autora (2019)

Os fluxos de entrada e saída encontram-se apresentados nos quadros a seguir, e estão reportados em função da unidade declarada (U.D.) de **1600 mudas**

prontas para o plantio⁵. Os dados reportam 12 meses da produção, e foram coletados entre janeiro e dezembro de 2019.

QUADRO 9 - ENTRADAS - PRODUÇÃO DE MUDAS

ENTRADAS - PRODUÇÃO DE MUDAS		UNID./1600 MUDAS	UNID.
MATÉRIA-PRIMA E INSUMOS	Sementes	0,06	kg
	Substrato	72,68	kg
	Fertilizante	3,96	kg
	Fungicida	0,03	kg
	Hidroplan	1,27	kg
ÁGUA	Água superficial	2086,00	l
RECURSOS ENERGÉTICOS	Elettricidade	56,00	MJ
TRANSPORTE	Caminhão médio 10-15 t.	12,17	tkm ⁶

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

Neste processo elementar a quantidade de substrato e adubo foram calculados com base no número de mudas produzidas, no volume do tubete utilizado, e na proporção de cada parcela de composição do substrato nos tubetes. O quantitativo de fungicida e Hidroplan foi fornecido pela empresa e seus fluxos de entrada foram distribuídos para a U.D. definida. A demanda de eletricidade foi fornecida de forma agregada e está associada à preparação de mudas, casa de germinação e ao pátio de rustificação.

Para o cálculo das emissões de transporte, foram utilizadas as distâncias médias indicadas no QUADRO 10 a seguir. A empresa parceira informou os fornecedores e as distâncias médias de cada insumo. No quadro, as cargas estão reportadas por U.D. (1600 mudas).

⁵ Foi definida esta U.D. porque a empresa reporta ser o número médio de mudas plantadas por hectare.

⁶ Tonelada quilômetro (tkm): unidade que corresponde ao transporte de uma tonelada de produto por quilômetro.

QUADRO 10 - DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE PRODUÇÃO DE MUDAS

MATERIAIS	MODAL DE TRANSPORTE	TIPO DE CAMINHÃO	DISTÂNCIA MÉDIA (km)	CARGA TRANSPORTADA (t)	RETORNA VAZIO (sim/não)
Substrato	rodoviário	médio 10-15t	163	0,07	não
Fertilizante	rodoviário	médio 10-15t	114	0,004	não
Sementes	rodoviário	médio 10-15t	197	0,0001	não
Fungicida	rodoviário	médio 10-15t	114	0,00003	não
Hidroplan	rodoviário	médio 10-15t	114	0,001	não

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

As emissões decorrentes do transporte foram calculadas com base no exposto no tópico 4.2.6.3 e estão reportadas separadamente das emissões do processo.

QUADRO 11 - SAÍDAS - PRODUÇÃO DE MUDAS

SAÍDAS - PRODUÇÃO DE MUDAS		UNID./1600 MUDAS	UNID.
PRODUTO	mudas prontas para o plantio	1600	un.
EMISSIONES PARA O AR	CO ₂ fóssil - processo	1,05	kg
	CH ₄ fóssil- processo	1,83E-05	kg
	N ₂ O fóssil- processo	9,14E-06	kg
	CO ₂ fóssil - transporte	0,50	kg
	CO ₂ biogênico - transporte	0,06	kg
	CH ₄ - transporte	7,32E-05	Kg
	CO - transporte	6,81E-04	kg
	NOx - transporte	0,004	kg
	NMHC - transporte	1,78E-04	kg
	MP - transporte	9,60E-05	kg

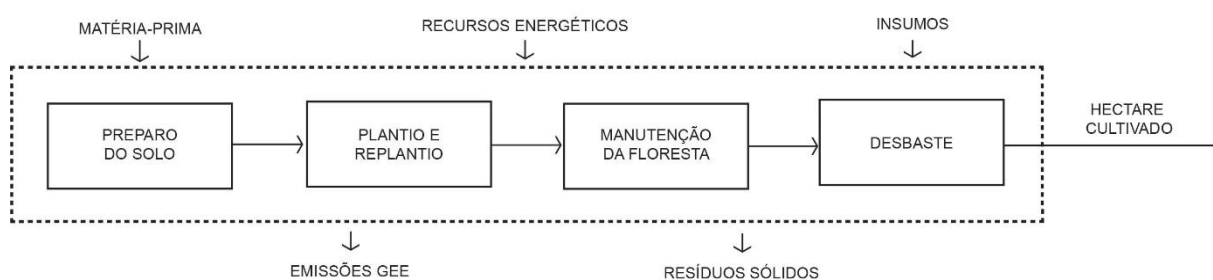
FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

Dentro do escopo deste estudo, ocorrem neste processo elementar, saídas de produto (mudas) e emissões para o ar.

4.3.1.2 Plantio e Manutenção da Floresta

O segundo ICV deste subsistema contempla as atividades denominadas como preparo do solo, plantio e replantio, manutenção da floresta (poda, roçada, controle de pragas) e desbaste, e estão apresentadas na FIGURA 34.

FIGURA 34 - FLUXOGRAMA ICV PLANTIO E MANUTENÇÃO DA FLORESTA



FONTE: Autora (2021).

Os fluxos de entrada e saída estão apresentados nos quadros a seguir e são reportados em função da unidade declarada de **1 hectare cultivado pronto para a colheita**. Os dados reportam 12 meses da produção, e foram coletados entre janeiro e dezembro de 2019.

QUADRO 12 - ENTRADAS - PLANTIO E MANUTENÇÃO DA FLORESTA

ENTRADAS- PLANTIO E MANUTENÇÃO DA FLORESTA		UNID./1 ha	UNID.
MATÉRIA-PRIMA E INSUMOS	Mudas prontas (plantio e replantio)	1,648.00	Unid
	Formicida	2,00	kg
	Herbicida	8,80	kg
RECURSOS ENERGÉTICOS	Diesel	2,59	l
	Gasolina	21,31	l
	Óleo lubrificante	0,02	l
	Graxa	0,01	kg
TRANSPORTE	Caminhão médio 10-15 t.	1,63	tkm

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

A partir do dado fornecido de que são plantadas 1600 mudas/ha, calculou-se a área cultivada a partir do número de mudas. As quantidades de aplicação de herbicida e formicida foram reportadas por hectare. Os dados de recursos energéticos estão associados às atividades de preparo do solo, plantio e manutenção da floresta no mesmo ano. O diesel utilizado no desbaste foi estimado com base em um fator de consumo por hectare fornecido pela empresa, assim como o óleo lubrificante e a graxa.

Para o cálculo das emissões de transporte, foram utilizadas as distâncias médias indicadas no QUADRO 13, a seguir. A empresa parceira informou os fornecedores e as distâncias médias de cada insumo. No quadro, as cargas estão reportadas por U.D. (1 ha).

QUADRO 13 - DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE PLANTIO E MANUTENÇÃO DA FLORESTA

MATERIAIS	MODAL DE TRANSPORTE	TIPO DE CAMINHÃO	DISTÂNCIA MÉDIA (km)	CARGA TRANSPORTADA (t)	RETORNA VAZIO (sim/não)
Herbicida	rodoviário	médio 10-15t	114	14,08	não
Formicida	rodoviário	médio 10-15t	114	3,20	não
Diesel	rodoviário	médio 10-15t	116	1437,24	não
Óleo Lubrificante	rodoviário	médio 10-15t	4,4	11,98	não
Graxa	rodoviário	médio 10-15t	137	0,86	não
Gasolina	rodoviário	médio 10-15t	45	25,30	não

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

As emissões decorrentes do transporte foram calculadas com base no exposto no tópico 4.2.6.3 e estão reportadas separadamente das emissões do processo.

QUADRO 14 - SAÍDAS - PLANTIO E MANUTENÇÃO DA FLORESTA

SAÍDAS - PLANTIO E MANUTENÇÃO DA FLORESTA		UNID./1 ha	UNID
PRODUTO	Hectares cultivados	1,00	ha
RESÍDUOS	Toras - desbaste	80,00	t. seca
	Resíduos - parcela de madeira que permanece na floresta (DESBASTE)	3,20	t. seca
EMISSÃO PARA O AR	CO ₂ fóssil - processo	6,20	kg
	CO ₂ biogênico - processo	0,72	kg
	CH ₄ fóssil - processo	3,74E-04	kg
	CH ₄ biogênico - processo	9,96E-05	kg
	N ₂ O fóssil - processo	3,35E-04	kg
	N ₂ O biogênico - processo	6,53E-06	kg
	CO ₂ fóssil - transporte	0,067	kg
	CO ₂ biogênico - transporte	0,008	kg
	CH ₄ - transporte	9,42E-06	kg
	CO - transporte	8,95E-05	kg
	NO _x - transporte	0,001	kg
	NMHC - transporte	2,35E-05	kg
	MP - transporte	1,41E-05	kg

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

Dentro do escopo deste estudo, ocorrem neste processo elementar saídas de produto (ha cultivado), resíduos (toras oriundas do desbaste e parcela da árvore que permanece na floresta), e emissões para o ar. O coproduto tora oriundo de desbaste foi calculado a partir do fator de produtividade de 140 t/ha e o resíduo lenhoso que permanece na floresta foi calculado com base no fator de 4% em relação à saída de toras no desbaste, dado fornecido por especialista da empresa.

4.3.1.3 Colheita

O terceiro ICV deste subsistema, denominado colheita, contempla somente a atividade de corte raso demonstrado na FIGURA 35 abaixo.

FIGURA 35 - FLUXOGRAMA ICV COLHEITA



FONTE: Autora (2021).

Os fluxos de entrada e saída estão apresentados nos quadros a seguir, e são reportados em função da unidade declarada de **1 tonelada de tora (seca com casca)**. Os dados reportam 12 meses da produção e foram coletados entre janeiro e dezembro de 2019.

QUADRO 15 - ENTRADAS - COLHEITA

ENTRADAS - COLHEITA		UNID./ 1 t. TORA	UNID.
MATÉRIA-PRIMA E INSUMOS	Hectare explorados	0,005	ha
RECURSOS ENERGÉTICOS	Óleo Lubrificante	0,009	l
	Graxas	0,010	kg
	Diesel	2,340	l
TRANSPORTE	Caminhão pesado 15-40 ton	0,229	tkm

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

A partir da quantidade de toras de madeira colhida em 2019 e do fator de produtividade informado por especialista da empresa (525 t/ha) foi possível calcular a área de floresta necessária para obter a unidade declarada de 1 t de tora de madeira seca com casca.

Para o cálculo das emissões de transporte, foram utilizadas as distâncias médias indicadas no QUADRO 16QUADRO 15 - ENTRADAS - COLHEITA, a seguir. A empresa parceira informou os fornecedores e as distâncias médias de cada insumo. No quadro, as cargas estão reportadas por U.D. (1 t tora seca com casca).

QUADRO 16 - DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE - COLHEITA

MATERIAIS	MODAL DE TRANSPORTE	TIPO DE CAMINHÃO	DISTÂNCIA MÉDIA (km)	CARGA TRANSPORTADA (t)	RETORNA VAZIO (sim/não)
Óleo Lubrificante	rodoviário	médio 10-15t	4,4	0.01	não
Graxa	rodoviário	médio 10-15t	137	0.01	não
Diesel	rodoviário	médio 10-15t	116	1.26	não

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

As emissões decorrentes do transporte foram calculadas com base no exposto no tópico 4.2.6.3 e estão reportadas separadamente das emissões do processo.

QUADRO 17 - SAÍDAS - COLHEITA

SAÍDAS - COLHEITA		UNID./ 1 t. TORA	UNID.
PRODUTO	Toras - corte raso	1,00	T seca
RESÍDUO	Massa da árvore que permanece na floresta	0,07	T seca
EMISSION P/ AR	CO ₂ fóssil - processo	5,48	kg
	CO ₂ biogênico - processo	0,63	kg
	CH ₄ fóssil - processo	2,95E-04	kg
	CH ₄ biogênico - processo	8,43E-05	kg
	N ₂ O fóssil- processo	2,89E-04	kg
	N ₂ O biogênico - processo	6,02E-06	kg
	CO ₂ fóssil - transporte	1,51E-06	kg
	CO ₂ biogênico - transporte	0,001	kg
	CH ₄ - transporte	1,39E-06	kg
	CO - transporte	1,28E-05	kg
	NOx - transporte	7,57E-05	kg
	NMHC - transporte	3,37E-06	kg
	MP - transporte	1,81E-06	kg

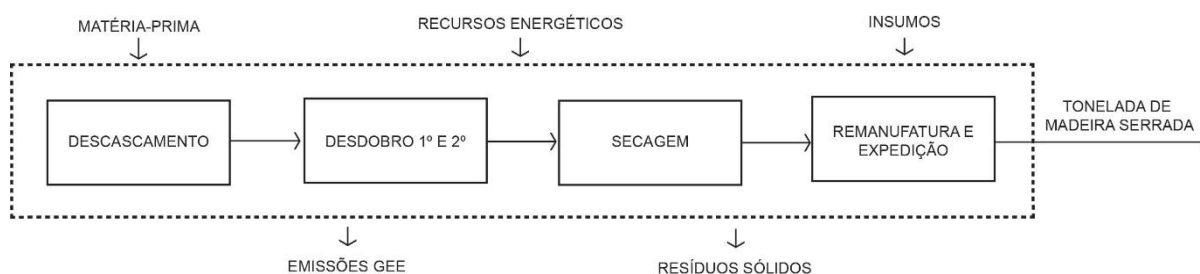
FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

Dentro do escopo deste estudo, ocorrem neste processo elementar, saídas de produto (toras), resíduos (% da árvore que permanece na floresta) e emissões para o ar. O quantitativo de toras comerciais foi fornecido pela empresa em m³ de tora verde e está convertido em t tora seca utilizando-se a densidade básica do Pinus de 400 kg/m³ (IPT, 2020) e um teor de umidade de 60% b.u. Considerou-se o fator de 7% de resíduo lenhoso que permanece na floresta após o corte raso, sendo uma estimativa qualificada fornecida por especialista da empresa. As emissões para o ar são decorrentes do consumo de combustíveis fósseis e lubrificantes no processo, bem como, do consumo de combustíveis para o transporte de insumos que entram neste processo elementar.

4.3.2 PRODUÇÃO DA MADEIRA SERRADA

O ICV da Produção da madeira Serrada contempla as atividades denominadas descascamento, desdobro primário e secundário, secagem, remanufatura e expedição, demonstradas da FIGURA 36.

FIGURA 36 - FLUXOGRAMA ICV PRODUÇÃO DA MADEIRA SERRADA



FONTE: Autora (2021).

Os fluxos de entrada e saída estão apresentados nos quadros a seguir, e são reportados em função da unidade declarada de **1 tonelada de madeira serrada seca (TU=0%) e aplainada**, no portão da serraria. Os dados reportam 12 meses da produção e foram coletados entre junho de 2018 e maio de 2019.

QUADRO 18 - ENTRADAS - PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA SECA E APLAINADA

ENTRADAS		UNID./ 1 t. MS.	UNID.
MATÉRIA-PRIMA E INSUMOS	Toras (produção própria)	1,85	t. seca
	Toras (produção terceiros)	0,64	t. seca
ÁGUA	Água concessionária	4,83	m³
	Água subterrânea (de poço)	0,01	m³
RECURSOS ENERGÉTICOS	Eletricidade	679,48	MJ
	Energia térmica – queima de biomassa	8959,75	MJ
	Diesel	1,37	l
	GLP	2,22	kg
	Lubrificantes	0,16	l
TRANSPORTE	caminhão pesado 15-40t	1299,7	tkm
	caminhão médio 10-15t	0,04	tkm

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

O quantitativo de entradas de toras de madeira, água e recursos energéticos foram fornecidos para o processo de interesse, com exceção da entrada de energia térmica, que foi calculada com base na entrada de biomassa e seu poder calorífico.

Para o cálculo das emissões de transporte, foram utilizadas as distâncias médias informadas pela empresa parceira, indicadas no QUADRO 19, a seguir. A distância média de transporte das entradas de toras de 2019 foi informada pela empresa. Para os demais insumos, a empresa informou os fornecedores e então buscou-se a distância de transporte por meio da ferramenta *Googlemaps*. No quadro, as cargas estão reportadas por U.D. (1 t. madeira serrada seca e aplainada).

QUADRO 19 - DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE - PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA SECA E APLAINADA

MATERIAIS	MODAL DE TRANSPORTE	TIPO DE CAMINHÃO	DISTÂNCIA MÉDIA (km)	CARGA TRANSPORTADA (t)	RETORNA VAZIO (sim/não)
Toras de madeira - recurso próprio	rodoviário	pesado 15-40t.	88,5	4,023	sim
Toras de madeira - recurso 3º	rodoviário	pesado 15-40t.	135	1,392	sim

Lubrificantes	rodoviário	médio 10-15t	52,5	0,00142	não
Diesel	rodoviário	médio 10-15t	8,4	110,63	não
GLP	rodoviário	médio 10-15t	9	0,023	não

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

As emissões decorrentes do transporte foram calculadas com base no tópico 4.2.5.3. e estão reportadas separadamente das emissões do processo.

QUADRO 20 - SAÍDAS - PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA SECA E APLAINADA

SAÍDAS - PLANTIO E MANUTENÇÃO DA FLORESTA		UNID./ 1 t. MS	UNID
PRODUTO	Madeira serrada seca	1,00	t. seca
RESÍDUO	Resíduos (casca, cavaco, serragem)	1,47	t. seca
	Cinzas*	0,03	t
EMISSÃO P/ O AR	CO ₂ fóssil - processo	25,37	kg
	CO ₂ biogênico - processo	904,96	kg
	CH ₄ fóssil- processo	0,01	kg
	CH ₄ biogênico - processo	0,27	kg
	N ₂ O fóssil - processo	0,0003	kg
	N ₂ O biogênico - processo	0,04	kg
	CO ₂ fóssil - transporte	18,25	kg
	CO ₂ bio - transporte	2,11	kg
	CH ₄ - transporte	0,0016	kg
	CO - transporte	0,02	kg
	NOx - transporte	0,14	kg
	NMHC - transporte	0,0039	kg
	MP - transporte	0,0032	kg

*Proveniente da queima de biomassa para geração de energia térmica para secagem.

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

Dentro do escopo deste estudo, ocorrem neste processo elementar, saídas de produto (madeira serrada seca), resíduos (cavaco, serragem, casca), e emissões

para o ar. Para conferência do fluxo de madeira dentro do sistema, foi feito um balanço geral de massa apresentado no QUADRO 21.

QUADRO 21 - BALANÇO DE MASSA

ENTRADAS	TONELADAS (TU=0%)
TORAS	20005,53
SAÍDAS	TONELADAS (TU=0%)
MADEIRA SERRADA SECA	8030,37
CASCA	2333,14
CAVACO VERDE (TU>15%)	8163,73
SERRAGEM	905,33
CAVACO SECO (TU≤15%)	344,90
TOTAL DE SAÍDAS	19852,46
MADEIRA NÃO CONTABILIZADA	153,07 (0,77%)

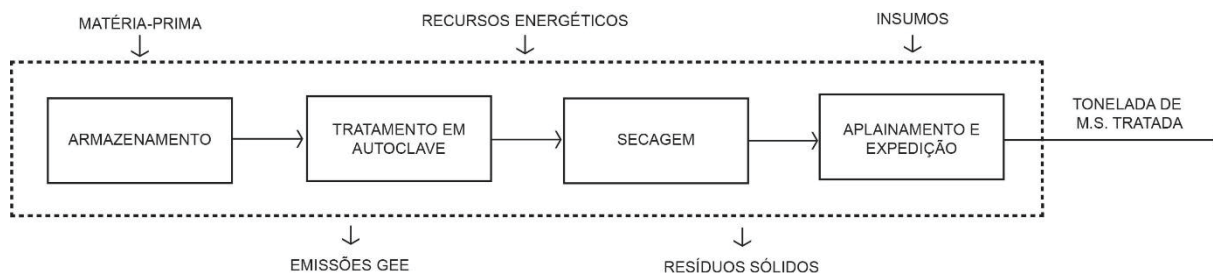
FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

A madeira não contabilizada - diferença entre o total de entrada e saída de material lenhoso - é de 153,07 toneladas (0,77%). Fatores como a dificuldade de contabilização de resíduos por perdas durante o beneficiamento, além da variação de umidade da madeira ao longo do processo contribuem para essa diferença. As considerações feitas para o cálculo do balanço de massa estão apresentadas no tópico 4.2.6.1. Observa-se que o produto deste subsistema corresponde a apenas 40% da massa que entra de matéria-prima (toras) e que 60% correspondem a coprodutos de baixo valor agregado.

4.3.3 TRATAMENTO DA MADEIRA

Este ICV contempla as atividades denominadas armazenamento, tratamento m autoclave, secagem, aplainamento e expedição. Ver FIGURA 37.

FIGURA 37 - FLUXOGRAMA ICV TRATAMENTO DA MADEIRA SERRADA



FONTE: Autora (2021).

Os fluxos de entrada e saída estão apresentados nos quadros a seguir, e estão reportados em função da unidade declarada de **1 tonelada de madeira serrada de Pinus seca (TU=0%) e tratada com Borato de Cobre Cromatado (CCB)**. Os dados reportam 12 meses da produção e foram coletados entre janeiro e dezembro de 2019.

QUADRO 22 - ENTRADAS - TRATAMENTO DE MADEIRA SERRADA COM CCB - TMS

ENTRADAS - PRODUÇÃO DE MUDAS		UNID./ 1 t. MS Tratada	UNID.
MATÉRIA-PRIMA E INSUMOS	Madeira serrada (Pinus)	1,10	t.
	CCB*	19,44	kg
ÁGUA	Água concessionária	1,31	m³
	Água da chuva	0,16	m³
RECURSOS ENERGÉTICOS	Eletricidade	244,52	MJ
	Óleo Diesel	3,81	l
	GLP	1,18	kg
	Energia térmica (biomassa)	396,15	MJ
	Óleo Lubrificante	0,05	l
	Caminhões pesados (15 - 40t)	392,83	tkm
	Caminhões médios (5 - 15 t)	8,86	tkm

*Os dados foram coletados originalmente para Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) e o especialista relatou que para CCB o processo produtivo é o mesmo, incluindo a concentração exigida para madeira serrada estrutural.

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

Os dados deste ICV foram declarados pela empresa. O procedimento de alocação foi baseado na produção em massa - do tratamento da madeira serrada de

Pinus em relação à produção total da indústria. Os fluxos de entrada e saída foram posteriormente distribuídos para a unidade declarada definida. O tratamento em CCB é reportado pela empresa brasileira produtora de CLT (CROSSLAM, 2021) e por isso este tratamento foi adotado neste ICV.

Para o cálculo das emissões de transporte, foram utilizadas as distâncias médias informadas pela empresa parceira, indicadas no QUADRO 23. Para a obtenção das distâncias de transporte, a empresa informou os fornecedores de cada insumo e então buscou-se a distância de transporte por meio da ferramenta *Googlemaps*. A distância média de transporte de madeira serrada de Pinus foi calculada por meio da média da distância percorrida para todas as entradas de fornecimento em 2019, ponderada pelo volume da carga de madeira entregue por cada fornecedor no mesmo ano. Analogamente, a distância média de transporte de CCB foi calculada pela distância dos fornecedores do insumo até a indústria, ponderada pela quantidade (em massa) do produto entregue por cada um deles no ano de 2019. No quadro, as cargas estão reportadas por U.D. (1 t. de madeira serrada de Pinus seca e tratada com CCB).

QUADRO 23 - DISTÂNCIAS MÉDIAS E MODAIS DE TRANSPORTE

MATERIAIS	MODAL DE TRANSPORTE	TIPO DE CAMINHÃO	DISTÂNCIA MÉDIA (km)	CARGA TRANSPORTADA (t)	RETORNA VAZIO (sim/não)
Madeira serrada de Pinus	rodoviário	pesado 15-40t.	279,4 (ida e volta)	1,20	sim
CCB	rodoviário	médio 10-15t	399	0,02	não
Diesel	rodoviário	médio 10-15t	116	0,003	não
GLP	rodoviário	médio 10-15t	18,6	0,001	não
Biomassa de terceiros	rodoviário	médio 10-15t	2,4	0,01	não
Lubrificantes	rodoviário	médio 10-15t	12,7	3,97E-05	não
Transporte - secagem em parceiro	rodoviário	médio 10-15t	5 (ida e volta)	0,32	não

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

As emissões decorrentes do transporte foram calculadas com base no exposto no tópico 4.2.6.3 e estão reportadas separadamente das emissões do processo.

QUADRO 24 - SAÍDAS - TRATAMENTO DE 1 TONELADA DE MADEIRA SERRADA COM CCB

SAÍDAS - PRODUÇÃO DE MUDAS		UNID./ 1 t. MS tratada	UNID.
PRODUTO	Madeira serrada de Pinus CCB	1,00	t seca
RESÍDUOS E COPRODUTOS LENHOSOS	Resíduo lenhoso tratado	0,002	t seca
	Resíduo lenhoso não tratado	0,009	t seca
	Cinzas – caldeira*	0,001	t
EMISSIONES PARA O AR	CO ₂ fóssil - processo	17,92	kg
	CO ₂ bio - processo	47,26	kg
	CH ₄ fóssil - processo	0,004	kg
	CH ₄ bio - processo	0,014	kg
	N ₂ O fóssil - processo	5,09E-04	kg
	N ₂ O bio - processo	0,002	kg
	CO ₂ fóssil - transporte	5,88	kg
	CO ₂ bio - transporte	0,68	kg
	CH ₄ - transporte	5,09E-04	kg
	CO - transporte	0,008	kg
	NO _x - transporte	0,03	kg
	NMHC - transporte	0,002	kg
	MP - transporte	0,001	kg

*Proveniente da queima de biomassa para geração de energia térmica para secagem.

FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

Dentro do escopo deste estudo, ocorrem neste processo elementar, saídas de produto (madeira serrada seca e tratada de *Pinus spp.*), resíduos (resíduo lenhoso tratado, não tratado e cinzas), e emissões para o ar. Para conferência do fluxo de madeira dentro do sistema, foi feito um balanço geral de massa apresentado no QUADRO 25.

QUADRO 25 - BALANÇO DE MASSA - TMS

ENTRADAS	TONELADAS (TU=0%)
MADEIRA SERRADA DE PINUS	176,92
SAÍDAS	TONELADAS (TU=0%)
MADEIRA SERRADA TRATADA E APLAINADA	82,09
MADEIRA SERRADA TRATADA BRUTA	75,18
GLULAM	1,81
PAISAGISMO (cercas e outras peças para jardinagem)	1,33
RESÍDUO LENHOSO TRATADO	0,28
RESÍDUO LENHOSO NÃO- TRATADO	1,51
TOTAL DE SAÍDAS	162,20
MADEIRA NÃO CONTABILIZADA	14,72 (8,32%)

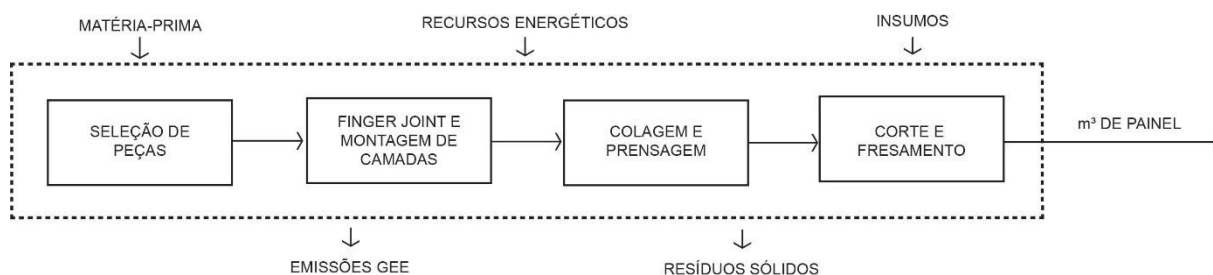
FONTE: Tavares et al. (2021) adaptado pela autora

A madeira não contabilizada - diferença entre o total de entrada e saída de material lenhoso - é de 162,20 toneladas (8,32%). Fatores como a dificuldade de contabilização de resíduos por perdas durante o beneficiamento, além da variação de umidade da madeira ao longo do processo contribuem para essa diferença. Ainda, este processo inventariado sofreu alocações, o que corrobora com a diferença apresentada no balanço de massa. As considerações feitas para o cálculo do balanço de massa estão apresentadas no tópico 4.2.6.1.

4.3.4 PRODUÇÃO DO CLT

Este ICV contempla as atividades denominadas como seleção das peças, união de topo *finger joint*, montagem das camadas, colagem e prensagem, corte e fresamento, demonstradas na FIGURA 38.

FIGURA 38 - FLUXOGRAMA ICV DA PRODUÇÃO DO CLT



FONTE: Autora (2021).

Os fluxos de entrada e saída estão apresentados nos quadros a seguir, e estão reportados em função da unidade declarada de **1 m³ de painel CLT estrutural**⁷ com TU= 0%.

QUADRO 26 - ENTRADAS – PRODUÇÃO DO CLT - PCLT

ENTRADAS - PRODUÇÃO DE MUDAS		UNID./ 1 m³ CLT	UNID.
MATÉRIA-PRIMA E INSUMOS	Madeira serrada tratada (Pinus)	0,48	t. seca
	Adesivo monocomponente à base de Poliuretano (PUR)	6,86	kg
RECURSOS ENERGÉTICOS	Eletricidade	356,04	MJ
	Óleo Diesel	0,05	l
	GLP	7,36	kg
	Óleo Lubrificante	0,002	l
	Transporte marítimo	75,30	tkm
	Caminhões médios (10 -15 t)	22,02	tkm

FONTE: Autora (2021).

Os dados deste ICV foram retirados do relatório realizado pelo *Consortium for Research on Renewable Industrial Materials* (CORRIM) intitulado *Life Cycle Assessment of Cross Laminated Timbers Produced in Oregon* (PUETTMANN; SINHA; GANGULY, 2018). A escolha da origem dos dados é decorrente da pesquisa bibliográfica apresentada no Capítulo III, pois este trabalho foi o único que apresentou

⁷ Painel estrutural é um painel autoportante capaz de suportar cargas e compor sistemas estruturais.

os dados do ICV descritos de forma desagregada permitindo a adaptação para a realidade brasileira.

A matéria prima utilizada no processo produtivo reportado no estudo original é madeira serrada seca em estufa da espécie de conífera Douglas-fir. Adaptou-se a entrada de madeira no processo para madeira serrada seca e tratada da espécie *Pinus spp.*, mantendo o volume de madeira que entra, porém, adotando a densidade básica de 400kg/m³ (IPT, 2020) para a madeira com TU=0%. Para o consumo de eletricidade, diesel e lubrificante foi utilizado o quantitativo do estudo norte americano na íntegra. Para o consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP), que no estudo original é gás natural (GN), foi utilizada uma conversão a partir do poder calorífico de ambos, sendo que o poder calorífico do GLP é 20% maior que o GN (EPE, 2019), logo o consumo foi reduzido em 20% para este estudo. Para o consumo do adesivo foi feita uma conversão de massa a partir das densidades dos adesivos, já que no estudo do CORRIM (2018) é reportado o uso do adesivo melamina formaldeído (MF) e para o exemplo brasileiro se utiliza o adesivo monocomponente à base de Poliuretano (PUR), utilizou-se o mesmo fabricante reportado no estudo norte-americano, o Akzo Nobel.

Para o cálculo das emissões de transporte, foi considerada uma localização na mesma região das empresas onde foram coletados os dados primários de produção madeireira, sendo escolhida a cidade de Ponta Grossa para uma possível produção de CLT. Para o cálculo das emissões, foram utilizadas as distâncias médias indicadas no QUADRO 27 e as cargas apresentadas se referem à U.D. de 1m³ de painel CLT com TU=0%.

QUADRO 27 - DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE PCLT

MATERIAIS	MODAL DE TRANSPORTE	TIPO DE CAMINHÃO	DISTÂNCIA MÉDIA (km)	CARGA TRANSPORTADA (t)	RETORNA VAZIO (sim/não)
Madeira serrada seca e tratada	rodoviário	Médio 10-15t.	30 (ida e volta)	0.48	sim
Adesivo PUR (Holanda)	marítimo	-	10108.22	0.01	não
	rodoviário	médio 10-15t	589	0.01	não
Óleo lubrificante	rodoviário	médio 10-15t	543	1.93E-06	não
Diesel	rodoviário	médio 10-15t	116	4.20E-05	não
GLP	rodoviário	médio 10-15t	19	0.01	não

FONTE: Autora (2021).

As emissões decorrentes do transporte foram calculadas com base no exposto no tópico 4.2.6.3 e estão reportadas separadamente das emissões do processo.

QUADRO 28 - SAÍDAS - PRODUÇÃO DE 1 M³ DE CLT – PCLT

SAÍDAS - PRODUÇÃO DE MUDAS		UNID./ 1 m ³ DE CLT	UNID.
PRODUTO	CLT	1,00	m ³
RESÍDUOS E COPRODUTOS LENHOSOS	Aparas de painel	0,02	t
	Resíduos lenhosos do processo de finger joint	0,01	t
	Resíduos lenhosos da Hundegger	0,01	t
	CLT fora das especificações e cortes finais	0,07	t
EMISSÕES PARA O AR	CO ₂ fóssil - processo	29,71	kg
	CO ₂ bio - processo	0,01	kg
	CH ₄ fóssil - processo	0,02	kg
	CH ₄ bio - processo	0,00	kg
	N ₂ O fóssil - processo	1,00E-04	kg
	N ₂ O bio - processo	0,00	kg
	CO ₂ fóssil - transporte	1,89	kg
	CO ₂ bio - transporte	0,10	kg
	CH ₄ - transporte	4,00E-04	kg
	CO - transporte	1,20E-03	kg
	NO _x - transporte	0,01	kg
	N ₂ O - transporte	0,01	kg
	NMHC - transporte	3,00E-04	kg
	MP - transporte	2,00E-04	kg

FONTE: Autora (2021).

Dentro do escopo deste estudo, ocorrem saídas de produto (painel CLT), resíduos (resíduo lenhoso) e emissões para o ar. Os dados de saída de produto e

resíduos foram extraídos do ICV do CORRIM (PUETTMANN; SINHA; GANGULY, 2018) devidamente convertidos para madeira de Pinus.

4.3.5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA – POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL E CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS

Os resultados da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) em termos de Potencial de Aquecimento Global e Consumo de Recursos Energéticos para 1m³ de painel CLT estão apresentados no QUADRO 29.

QUADRO 29 - RESULTADOS AICV PARA 1M³ DE CLT

Categoria de Impacto	Unidade	Operações Florestais (OF)	Produção de Madeira Serrada (PMS)	Tratamento de Madeira Serrada (TMS)	Produção de CLT (PCLT)	Total
Potencial de Aquecimento Global						
Processo	kgCO ₂ eq	4,82	15,95	7,80	30,43	59,01
Transporte	kgCO ₂ eq	0,003	8,41	2,50	1,90	12,81
Total GWP	kgCO ₂ eq	4,83	24,37	10,29	32,34	71,82
Energia						
Fóssil - processo	MJ	98,25	141,29	118,39	388,46	746,39
Renovável - processo	MJ	13,25	5248,03	314,07	270,13	5845,47
Fóssil - transporte	MJ	0,21	424,70	48,19	14,76	487,87
Renovável - transporte	MJ	0,02	52,49	5,95	1,82	60,30
Total - Energia	MJ	111,74	5866,51	486,61	675,17	7140,03

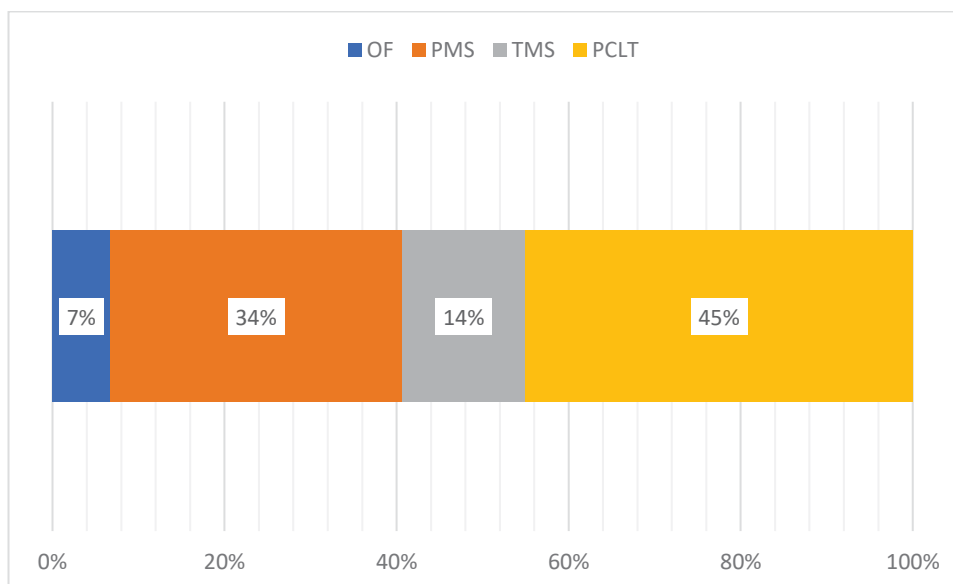
FONTE: Autora (2021).

4.4 DISCUSSÃO

Quanto aos resultados de Potencial de Aquecimento Global, apresentados em emissões de quilos de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq.) por subsistema, observa-se que a PCLT é responsável por 45% das emissões, seguido por PMS com 34%, depois TMS com 14% e por último, OF com 7% das emissões totais (FIGURA

39). Estas emissões estão relacionadas ao consumo de energia elétrica, diesel, GLP e lubrificantes na cadeia produtiva.

FIGURA 39 - PORCENTAGEM DE EMISSÕES DE CO₂eq POR SUBSISTEMA



FONTE: Autora (2021)

Com relação às operações florestais (OF), estudos apontam o processo de colheita como maior contribuinte das emissões de GEE (ZHOU *et al.*, 2015; NAKANO *et al.*, 2016; FERRO *et al.*, 2018). A alta quantidade de combustível fóssil necessária para as máquinas pesadas utilizadas nas atividades envolvidas nesta etapa está por trás desse resultado (DE LA FUENTE *et al.*, 2017), já que o consumo de combustível durante a colheita, arraste, carregamento, transporte da floresta para a indústria de processamento representam as principais emissões do processo de OF (ZHOU *et al.*, 2015; DE LA FUENTE *et al.*, 2017).

Os impactos ocasionados pelo nível de mecanização não dependem somente do tipo de maquinário, mas também de fatores como produtividade e condições físicas da área do plantio, como declividade e acessibilidade, já que isso influencia diretamente no consumo de combustíveis (CARDELLINI *et al.*, 2018). Ferro *et al.* (2018) apontam que as etapas de colheita e extração da madeira, devido a utilização destes tipos de maquinários, respondem a 80% da necessidade total de combustível em todo o ciclo de vida da produção de madeira de Pinus.

Quanto ao subsistema PMS, García-Durañona *et al.* (2016) apontam como *hotspot* a ineficiência dos processos, evidenciada pelo grande volume de resíduo lenhoso gerado. Esses autores destacam que ações no manejo florestal poderiam incrementar a qualidade da madeira, aumentando assim o aproveitamento de toras, e consequentemente reduzindo o consumo energético alocado aos produtos principais desta cadeia. García-Durañona *et al.* (2016) reportam que os resíduos lenhosos podem ser utilizados como fonte de energia e a contabilização deste carbono biogênico agrega valor à madeira em relação aos seus substitutos fósseis. Proto *et al.* (2017) também argumentam que aumentar a produtividade é o melhor caminho para reduzir os impactos e que o uso dos resíduos como biomassa para produção de energia térmica agrega valor na cadeia produtiva da madeira.

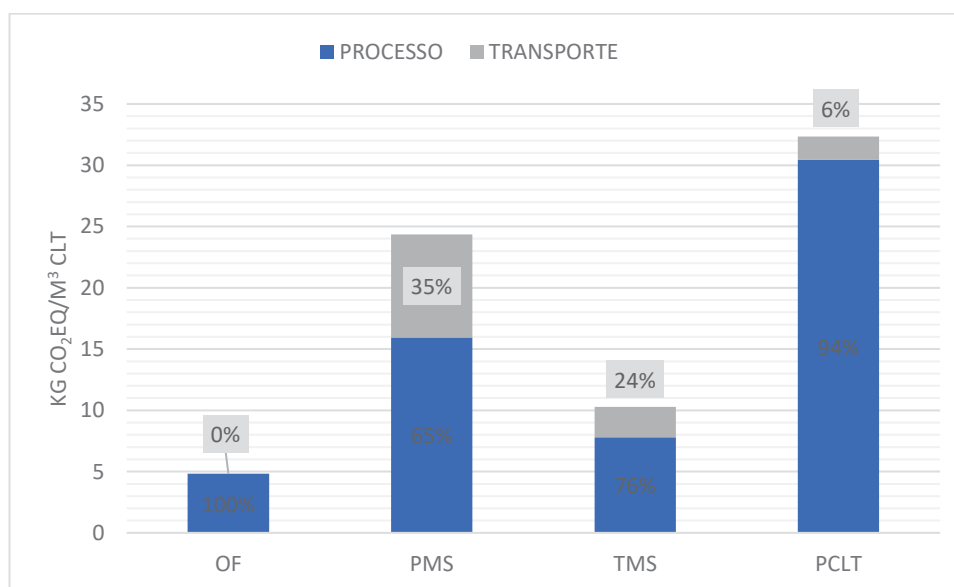
O uso de eletricidade no processo de desdobro da madeira se mostra como a principal causa das emissões de GEE em PMS (MURPHY, DEVLIN e MCDONNELL, 2015; GARCÍA-DURAÑONA *et al.*, 2016; RATNASINGAM *et al.*, 2017). Estas emissões devem ser olhadas com cautela, uma vez que em países com matriz energética não renovável, as emissões fósseis tendem a ser maiores, enquanto em regiões com matriz energética renovável, como a hidrelétrica, estas emissões tendem a ser significativamente reduzidas. Portanto a matriz energética utilizada para a produção de energia empregada no processo influencia diretamente no resultado de emissões - fósseis ou não - a ele associadas. Ainda, ressalta-se a oportunidade de reaproveitamento de resíduos de biomassa no suprimento da demanda energética dos processos produtivos de materiais lenhosos. Em relação à participação de emissões na análise da produção de PMS do portão-ao-portão, Ramasamy *et al.* (2015) apontam a emissão de CO₂ como maior parcela, seguida por SO₂, NO_x e CO. Emissões de carbono mostram-se variáveis de acordo com as espécies de madeira (BERGMANN AND BOWE, 2012; RATNASINGAM *et al.*, 2015). Alguns autores relatam que a madeira de coníferas geralmente requer menos energia elétrica e térmica em seu processamento em comparação com a madeira de folhosas (BERGMAN e BOWE, 2008; BERGMANN e BOWE, 2010; BERGMAN e BOWE, 2012). O transporte de toras da floresta à serraria também é apontado como um relevante processo na contribuição de impactos, resultando em resultados quase tão relevantes quanto os resultantes da colheita em OF (ABBAS E HANDLER, 2017).

O TMS contribui para 14% das emissões de GEE e essas emissões decorrem do consumo de eletricidade e combustíveis fósseis na planta, mas a maior

contribuição está relacionada ao transporte da madeira até a empresa. No caso da PCLT, cuja contribuição é a maior, com 45% das emissões GEE desta cadeia, o GLP é o principal contribuinte para o valor de Potencial de Aquecimento Global, seguido pelo diesel e depois pela energia elétrica. Logo, a redução do consumo do GLP poderia melhorar o desempenho nesta categoria de impacto.

Os transportes dos insumos, reportados separadamente neste trabalho, representam uma parcela menor dessas emissões, ver FIGURA 40. Isso se deve principalmente à localização das empresas inventariadas se dar na mesma região. Observa-se que as emissões decorrentes de transporte foram significativas no subsistema de PMS, já que o principal insumo (tora de madeira) é transportado por caminhões pesados da floresta para serraria em uma distância média calculada em 109 km. O impacto decorrente do transporte certamente seria mais significativo caso a localização das indústrias variasse, e o transporte da madeira (principal insumo desta cadeia) implicasse em grandes distâncias a serem percorridas.

FIGURA 40 - EMISSÕES DE CO₂ eq. – PROCESSO E TRANSPORTE



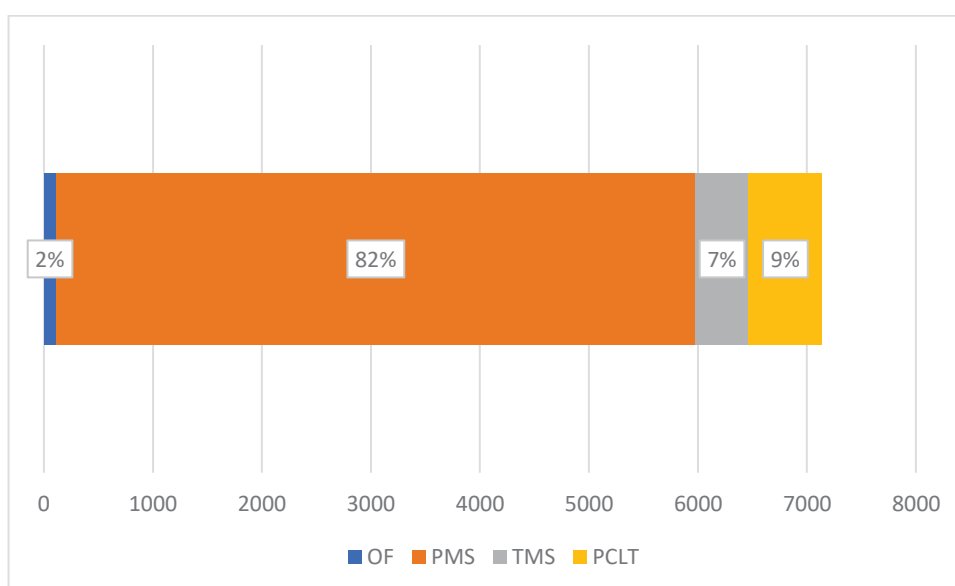
FONTE: Autora (2021)

Chen, Pierobon e Ganguly (2019) reportam que a categoria de impacto potencial de aquecimento global, para cadeia produtiva do CLT, é fortemente atingida pelo fator transporte, já que encontraram uma possível redução de emissões (+/-14%) com a compra de madeira local e/ou de espécies mais leves. Estes autores também apontam a fabricação do adesivo estrutural como responsável por 30% dos resultados

gerais desta categoria de impacto. Para Puettman, Sinha e Ganguly (2019) o uso de gás natural e a produção de adesivo foram os principais responsáveis pelas emissões de GEE.

Quanto ao consumo de recursos energéticos o subsistema com a maior demanda foi a PMS com 82% do total de energia consumida (FIGURA 41). Este consumo está principalmente associado à energia térmica consumida nas estufas de secagem que tem como fonte energética a biomassa. Após PMS, os subsistemas com maior demanda são PCLT, com 9% do consumo energético, seguido pelo TMS, com 7%, e, por último OF, com 2% do consumo total da cadeia (FIGURA 41).

FIGURA 41 - CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS POR SUBSISTEMA



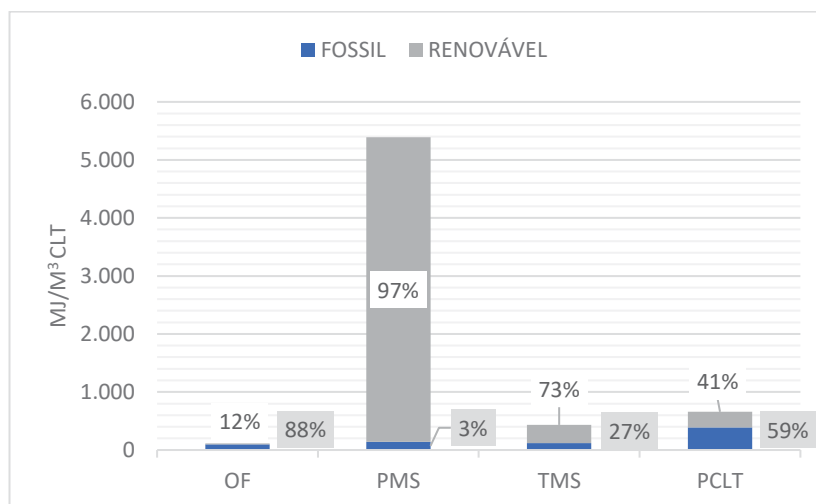
FONTE: Autora (2021)

Outro subsistema que também faz uso da energia térmica de biomassa é o TMS, igualmente para uso de secagem em estufa. Observa-se que estes dois subsistemas se destacam pelo uso de energia renovável (FIGURA 42). Na PCLT a principal fonte energética é a elétrica da concessionária, o que contribui para que este subsistema tenha 41% do consumo energético em energia de fonte renovável, com base na matriz de eletricidade brasileira (FIGURA 42).

Contribui também, com pequena parcela de energia renovável, os biocombustíveis adicionados à composição dos combustíveis utilizados no processo. Em OF, o maior consumo energético é o destinado ao maquinário florestal, como

diesel e lubrificantes, logo 88% do consumo energético na produção florestal é de origem fóssil, conforme demonstrado na FIGURA 42.

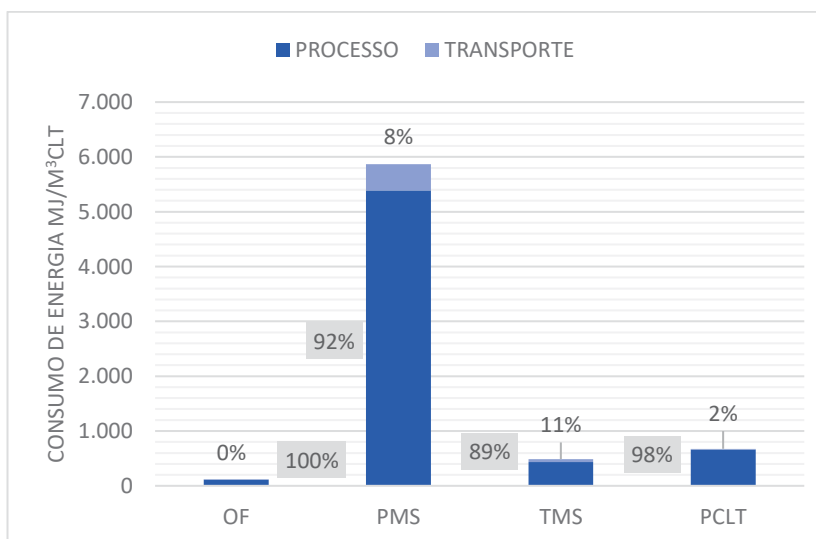
FIGURA 42 - CONSUMO ENERGÉTICO DO PROCESSO POR SUBSISTEMA: FÓSSIL X RENOVÁVEL



FONTE: Autora (2021)

O consumo energético atribuído ao transporte é pequeno em relação ao processo. Como discutido anteriormente, isto ocorreu devido a particularidade de as empresas inventariadas estarem localizadas próximas umas às outras, contribuindo para que o impacto causado pelo uso de combustíveis em transporte fosse menor, como observado na FIGURA 43.

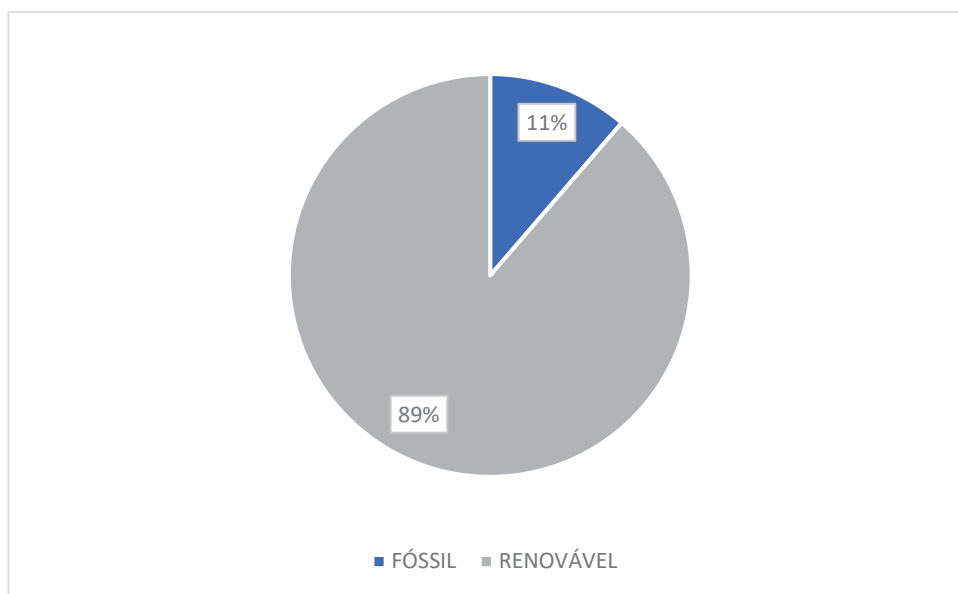
FIGURA 43 - CONSUMO ENERGÉTICO - PROCESSO X TRANSPORTE



FONTE: Autora (2021)

A maior parte do consumo energético desta cadeia é de fonte renovável, conforme mostra FIGURA 44, em torno de 89%. Contribuem para isso o uso da energia de biomassa, o uso de biodiesel e a matriz energética nacional, constituída em grande parte por hidrelétricas.

FIGURA 44 - CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL DO PROCESSO: FÓSSIL X RENOVÁVEL



FONTE: Autora (2021)

4.4.1 CONTABILIZAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO

A madeira é composta de carbono incorporado por meio da captura do dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera durante o crescimento das árvores, sendo que, estes dois efeitos – substituição (de outros materiais) e sequestro (de CO_2 atmosférico) – tornam o uso da madeira em detrimento a outros materiais uma economia de emissões de carbono (BERGMAN *et al.*, 2014). Alguns estudos de ACV indicam que o carbono biogênico sequestrado em produtos de madeira de longa duração pode trazer benefícios ambientais (BAUL *et al.*, 2017; GANGULY, PIEROBON AND SONNE HALL, 2020). García-Durañona *et al.* (2016) relatam que o sequestro de carbono na madeira depende de muitas variáveis no ciclo de vida, como a origem da madeira, o tipo de manejo florestal utilizado e como é o fim de vida do produto, se é reutilizado ou decomposto em aterro. Os autores afirmam que não informar dados sobre carbono biogênico é deixar de lado informações ambientais relevantes dessa cadeia produtiva,

ofuscando potenciais vantagens ambientais da madeira sobre seus substitutos não renováveis. Ganguly, Pierobon e Sonne Hall (2020) comparam as emissões de GEE com o sequestro de carbono promovido pelas florestas do estado de Washington e relatam que o potencial de mitigação do aquecimento global promovido pelas florestas é de cerca de 4,4% do total de emissões de GEE do estado, sem incluir as emissões provenientes da produção desta madeira. De Rosa, Pizzol e Schmidt (2017) observam que as diferentes práticas de manejo, bem como os tipos de produtos florestais resultantes, afetam o sequestro de CO₂, e, portanto, os estudos de ACV devem abordar o horizonte temporal na dinâmica dos fluxos de carbono nas atividades florestais. Esses autores relatam que é necessário justificar a escolha da métrica com base nos impactos das mudanças climáticas abordadas e que são necessárias mais pesquisas sobre o ciclo biogênico do carbono para estudos de ACV de materiais de base biológica.

O conteúdo de carbono na madeira é calculado a partir da proporção de 50% em relação à massa seca de madeira (IPCC, 2019). Logo, a partir da densidade básica do *Pinus spp.* de 400 kg/m³ (IPT, 2020) e da relação com a massa molar do carbono (44/12) encontra-se o valor aproximado do carbono estocado por m³. Na Tabela 05 encontra-se demonstrado o sequestro promovido por 1m³ de painel CLT dentro do escopo deste estudo. Com a subtração das emissões ao longo do ciclo de vida, 1m³ de painel mantém sequestrado 661,39 kg de CO₂ ao longo de sua vida útil.

TABELA 5: SEQUESTRO DE CARBONO PARA 1M³ DE CLT

Berço-ao-portão	Kg CO ₂ equivalente
Operações Florestais	4,82
Produção da Madeira Serrada	15,95
Tratamento da Madeira Serrada	7,80
Produção do CLT	30,43
Transporte	12,81
CO ₂ estocado	-733,2
Balanco de Carbono	-661,39

FONTE: Autora (2021).

Enfatiza-se que neste estudo não foram incluídas nas fronteiras as emissões decorrentes da produção de insumos utilizados no processo, com exceção da produção de materiais lenhosos e da energia elétrica. A inclusão dos dados de produção dos insumos não inclusos resultaria em um aumento de emissões de CO₂ eq., e consequentemente o resultado do balanço de carbono seria menor em módulo. Porém, análises de balanço de carbono reportadas em estudos desta mesma cadeia produtiva apresentam um estoque de carbono maior do que as emissões, mesmo com a inclusão da produção dos insumos nas fronteiras (HAFNER e SCHÄFER, 2017; LIU *et al.*, 2016; LOLLI, FUFA, WIJK, 2019; MONCASTER *et al.*, 2018; PAL *et al.*, 2017; ROBERTSON, LAM, COLE, 2012; TETTEY, DODOO, GUSTAVSSON, 2019; DONG *et al.*, 2019; ZEITZ, GRIFFIN, DUSICKA, 2019; ZIGART *et al.*, 2018).

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi identificado neste estudo que a etapa de fabricação do painel CLT foi a maior contribuinte para a categoria de Potencial de Aquecimento Global devido ao consumo de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). A fase de PMS foi a etapa que mais consumiu energia, porém, 97% deste consumo é de origem renovável (em grande parte biomassa de resíduo lenhoso). Os pontos críticos ambientais de OF foram o processo de colheita e o transporte de toras, nos quais destaca-se a forte influência do consumo de combustíveis fósseis pelo maquinário. Já na produção de madeira serrada, destaca-se o consumo de energia utilizada no desdobro e na secagem. O uso da biomassa para a produção de energia para serraria é apontado como potencial mitigador de emissões fósseis. O aumento da qualidade da madeira poderia ser um fator de melhoria ambiental, pois contribui para a redução de resíduos e o melhor aproveitamento dos recursos energéticos. O uso do painel CLT em edificações poderia contribuir para a mitigação do aquecimento global, pois esta cadeia produtiva se caracteriza pelo uso de energia renovável além de promover o estoque de carbono.

4.6 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Reconhece-se como lacuna científica deste estudo, a inclusão de outras etapas do ciclo de vida do produto, como sua aplicação e uso nas edificações, bem como o fim de vida e suas emissões biogênicas.

Como limitação deste estudo, destaca-se a desconsideração das emissões da produção dos insumos, já que para uma análise mais robusta do estoque de carbono seria importante ter contabilizado processos como a produção do Adesivo monocomponente à base de Poliuretano (PUR).

Como sugestão para futuros estudos, destacam-se: a realização de uma análise de sensibilidade sobre os transportes da cadeia; a coleta de dados primários para a produção de CLT brasileira; a análise de outras etapas do ciclo de vida do painel; a análise de outras categorias de impacto; o estudo do desempenho térmico/acústico para o clima tropical e suas implicações no consumo energético.

4.7 REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO IV

ABBAS, D.; HANDLER, R. M. Life-cycle assessment of forest harvesting and transportation operations in Tennessee. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 512–520, 2018.

ALAM, A.; KELLOMAKI, S.; KILPELAINEN, A.; STRANDMAN, H. Effects of stump extraction on the carbon sequestration in Norway spruce forest ecosystems under varying thinning regimes with implications for fossil fuel substitution. **GLOBAL CHANGE BIOLOGY BIOENERGY**, v. 5, n. 4, p. 445–458, 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b

BAUL, T. K.; ALAM, A.; STRANDMAN, H.; KILPELÄINEN, A. Net climate impacts and economic profitability of forest biomass production and utilization in fossil fuel and fossil-based material substitution under alternative forest management. **Biomass and Bioenergy**, v. 98, p. 291–305, 2017

BERGMAN, Richard *et al.* The carbon impacts of wood products. **Forest Products Journal**, USA, v. 64, n. 7, p.320-332, out. 2014

BERGMAN, R. D.; BOWE, S. A. Environmental impact of producing hardwood lumber using life-cycle inventory. **Wood and Fiber Science**, v. 40, n. 3, p. 448–458, 2008.

BERGMAN; R.D.; BOWE, A.S. Environmental impact of manufacturing softwood lumber in northeastern and north central United States. **Wood and Fiber Science**, v. 42, p. 67–78.

BERGMAN, R.D.; BOWE, S.A. Life-cycle inventory of manufacturing hardwood lumber in southeastern US. **Wood and Fiber Science**, v. 44, n. 1, p. 71–84. 2012.

BULLE, C., MARGNI, M., PATOUILLARD, L. *et al.* IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. **Int J Life Cycle Assess** 24, 1653–1674 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>

CARDELLINI, G.; VALADA, T.; CORNILLIER, C.; *et al.* EFO-LCI: A New Life Cycle Inventory Database of Forestry Operations in Europe. **Environmental Management**, v. 61, n. 6, p. 1031–1047, 2018.

CHEN, C. X.; PIEROBON, F.; GANGULY, I. Life Cycle Assessment (LCA) of Cross-Laminated Timber (CLT) produced in Western Washington: The role of logistics and wood species mix. **Sustainability**. 2019

CROSSLAM. *Cross Laminated Timber*. Comercial. Disponível em: <www.crosslam.com.br>. Acesso em: ago. 2020.

DEFRA. **UK Government Conversion Factors for greenhouse gas (GHG) reporting**. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2019> (Spreadsheet). Acesso em: Abr. 2020.

DE LA FUENTE, T.; ATHANASSIADIS, D.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; NORDFJELL, T. Cradle-to-gate life cycle assessment of forest supply chains: Comparison of Canadian and Swedish case studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 866–881, 2017

DE ROSA, M.; PIZZOL, M.; SCHMIDT, J. How methodological choices affect LCA climate impact results: the case of structural timber. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 1, p. 147–158, 2018

DONG, Y.; CUI, X.; YIN, X.; CHEN, Y.; GUO, H. Assessment of Energy Saving Potential by Replacing Conventional Materials by *Cross Laminated Timber* (CLT)-A Case Study of Office Buildings in China. **Applied Sciences**. 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Colheita de Pinus**. Disponível em: <<https://www.EMBRAPA.br/busca-de-imagens/-/midia/3357001/colheita-de-Pinus>>. Acesso em Mar. 2021.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>

EPE. Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear** / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coordenador). Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao->

European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. First edition March 2010. Traduzido por Luiz Marcos Vasconcelos. EUR 24708EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010.

FERRO, F. S.; SILVA, D. A. L.; ICIMOTO, F. H.; LAHR, F. A. R.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S. Environmental Life Cycle Assessment of industrial pine roundwood production in Brazilian forests. **Science of the Total Environment**, v. 640–641, p. 599–608, 2018

GANGULY, I.; PIEROBON, F.; SONNE HALL, E. Global Warming Mitigating Role of Wood Products from Washington State's Private Forests. **Forests**, v. 11, n. 2, 2020

GARCÍA-DURAÑONA, L.; FARRENY, R.; NAVARRO, P.; *et al.* Life Cycle Assessment of a coniferous wood supply chain for pallet production in Catalonia, Spain. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 178–188, 2016.

GHG PROTOCOL. Greenhouse Gas Protocol. **Metodologia do GHG Protocol da agricultura**. 2015. Disponível em: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards_supporting/Metodologia.pdf

GHG. **Programa brasileiro GHG Protocol**. Disponível em: <http://ferramenta.ghgprotocolbrasil.com.br/index.php?r=site/ferramenta>. 2020.

GRUPO AS RESINAS. Disponível em: <https://grupoasresinas.com.br/negocios/florestal/> >. Acesso em: Mar. 2021

HAFNER, A.; RÜTER, S. Method for assessing the national implications of environmental impacts from timber buildings-an exemplary study for residential buildings in Germany. *Wood and Fiber Science*, v. 50, p. 139–154, 2018. **Society of Wood Science and Technology**.

HAFNER, A.; SCHÄFER, S. Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level. **Journal of Cleaner Production**. 2017.

IEA - International Energy Agency. **Transition to sustainable buildings**. Paris, 2013.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry**. 2003. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC 2006 **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume 2 – Energy, Capítulo 1- Introduction. 2006a. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC 2006 **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume 2 – Energy, Capítulo 2- Stationary Combustion. 2006b. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC 2006 **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume 2 – Energy, Capítulo 3- Mobile Combustion. 2006c. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch12_HarvestedWoodProducts.pdf

IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Consultas online: **Informações sobre madeiras**. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7 Acesso em abril de 2020.

KOFMAN, PIETER D. Units, conversion factors and formulae for wood for energy. **COFORD - Wood Energy**. 2010. Disponível em: <http://www.woodenergy.ie/media/coford/content/publications/projectreports/cofordconnections/ht21.pdf>

LIU, Y.; GUO, H.; SUN, C.; CHANG, W. Assessing *Cross Laminated Timber* (CLT) as an Alternative Material for Mid-Rise Residential Buildings in Cold Regions in China—A Life-Cycle Assessment Approach. **Sustainability**. 2016.

LOLLI, N.; FUFA, S. M.; WIIK, M. K. An assessment of greenhouse gas emissions from CLT and glulam in two residential nearly zero energy buildings. **Wood Material Science & Engineering**. 2019.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Gabinete da Ministra. Portaria no 75, de 5 de março de 2015. MAPA. 2015a. Disponível em: https://www.udop.com.br/download/legislacao/tributacao/institucional_site_juridico/mapa_port_%2075_e_resol_cima%2001_2015_27_por_centro.pdf

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Terceiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa - Setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas**. Brasília: MCTIC, 2015.

MONCASTER, A. M.; POMPONI, F.; SYMONS, K. E.; GUTHRIE, P. M. Why method matters: temporal, spatial and physical variations in LCA and their impact on choice of structural system. **Energy and Buildings**. 2018.

MURPHY, F.; DEVLIN, G.; MCDONNELL, K. Greenhouse gas and energy-based life cycle analysis of products from the Irish wood processing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 92, p. 134–141, 2015

NAKANO, K.; ANDO, K.; TAKIGAWA, M.; HATTORI, N. Life cycle assessment of wood-based boards produced in Japan and impact of formaldehyde emissions during the use stage. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 4, p. 957–969, 2018

PAL, S. K.; TAKANO, A.; ALANNE, K.; PALONEN, M.; SIREN, K. A multi-objective life cycle approach for optimal building design: A case study in Finnish context. **Journal of Cleaner Production**. 2017.

PUETTMANN, M.; SINHA, A.; GANGULY, I. Life cycle energy and environmental impacts of *Cross Laminated Timber* made with coastal Douglas-fir. **Journal of Green Building**. 2019.

PROTO, A. R.; BACENETTI, J.; MACRÌ, G.; FIALA, M.; ZIMBALATTI, G. Mechanisation of different logging operations: Environmental impact assessment using life cycle assessment (LCA) approach. **Chemical Engineering Transactions**, v. 58, p. 229–234, 2017.

RATNASINGAM, J.; RAMASAMY, G.; TOONG, W.; *et al.* An Assessment of the Carbon Footprint of Tropical Hardwood Sawn Timber Production. **BioResources**, v. 10, n. 3, p. 5174–5190, 2015.

RB FLORESTAL. Disponível em: <<https://rbflorestaeresinagem.com.br/comercial/>>. Acesso em: jan. 2021

ROBERTSON, A. B.; LAM, F. C. F.; COLE, R. J. A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: laminated timber or reinforced concrete. **Buildings**. 2012.

SIH - Sistema de Informações Hidrológicas. Instituto das Águas do Paraná. Disponível em: <http://www.sih-web.aguasparana.pr.gov.br/sih-web/gerarRelatorioAlturasDiariasPrecipitacao.do?action=carregarInterfacelInicial>.

TAVARES, S. F.; FISCHER, A. C.; SANCHOTENE, C. Y. S.; DA SILVA, D. A.; PUNHAGUI, K. R. G.; DE AZEVEDO, N. C.; DOS SANTOS, E. PICOLOTTO; LANGER, M.; BERNARDO, J. **Relatório técnico de projeto aprovado na chamada mcti/cnpq nº 40/2018: Apoio à produção de inventários de avaliação de ciclo de vida. 2021.** (Relatório de pesquisa).

TETTEY, U. Y. A.; DODOO, A.; GUSTAVSSON, L. Effect of different frame materials on the primary energy use of a multi storey residential building in a life cycle perspective. **Energy and Buildings**. 2019.

UNEP. **The 10 Year Framework of Programmes on Sustainable Buildings and Construction**. Disponível em: <<http://www.scpclearinghouse.org/sites/default/files/10yfp-sbc-brochure-en.pdf>>. 2016.

UNEP. **Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers**. Paris: UNEP SBCI, 2009. Disponível em: <https://www.cakex.org/sites/default/files/documents/buildings_and_climate_change.pdf>.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC). **Materioteca Sustentável**. Disponível em: <<https://materioteca.paginas.ufsc.br/Pinus-taeda/>>. Acesso em: Mar. 2021.

ZEITZ, A.; GRIFFIN, C. T.; DUSICKA, P. Comparing the embodied carbon and energy of a mass timber structure system to typical steel and concrete alternatives for parking garages. **Energy & Buildings**. 2019

ZIGART, M.; LUKMAN, R.K.; PREMROV, M.; LESKOVAR, V. Z. Environmental impact assessment of building envelope components for low-rise building. **Energy**. 2018

ZHOU, Y.; ZHENG, L.-F.; ZHOU, X.-N.; *et al.* Greenhouse gas (GHG) emissions and the optimum operation model of timber production systems in Southern China. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 24, n. 11A, p. 3743–3753, 2015

[illegible][illegible]