



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DA UFSC - FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Samuel da Silva Santos

**Avaliação do processo produtivo e das propriedades físico-mecânicas da
chapa de *Laminated Veneer Lumber Pinus taeda*.**

Florianópolis-SC
2023

Samuel da Silva Santos

**Avaliação do processo produtivo e das propriedades físico-mecânicas da
chapa de *Laminated Veneer Lumber Pinus taeda*.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração construção civil.
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Poliana Dias de Moraes.
Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo.

Florianópolis

2023

Santos, Samuel da Silva

Avaliação do processo produtivo e das propriedades físico-mecânicas da chapa de Laminated Veneer Lumber Pinus taeda / Samuel da Silva Santos ; orientadora, Poliana Dias de Moraes, coorientador, Rodrigo Figueiredo Terezo, 2023.

122 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Fabricação. 3. Laminated Veneer Lumber. 4. Madeira. 5. Construção civil. I. Moraes, Poliana Dias de. II. Terezo, Rodrigo Figueiredo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Samuel da Silva Santos

**Avaliação do processo produtivo e das propriedades físico-mecânicas da
chapa de *Laminated Veneer Lumber Pinus taeda*.**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 13 de novembro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Poliana Dias de Moraes, Dr^a.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Darci Alberto Gatto, Dr.
Universidade Federal de Pelotas

Prof. Fernanda Fernandes Marchiori, Dr^a.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Poliana Dias de Moraes, Dr^a.
Orientadora

Florianópolis
2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço àquele que me trouxe e me guiou até aqui... DEUS. Agradeço à minha família, minha mãe **Adelice Santos** e minha irmã **Jane Cleide Silva**, por todo apoio e por acreditar na mudança de nossas realidades através da educação.

Agradeço à minha estimada orientadora, Prof^a. **Poliana Dias de Moraes**, pela paciência e atenção, jamais negligenciada durante todo esse período de muito trabalho.

Agradeço grandemente ao meu coorientador, Prof. **Rodrigo Figueiredo Terezo**, por sempre se mostrar disposto a me auxiliar, e disponibilizar meios necessários para o desenvolvimento da minha pesquisa.

Agradeço ao Prof. **Alexsandro Bayestorff da Cunha** por não medir tempo e esforços para que eu pudesse realizar minhas atividades. Sou grato pela sua paciência de me ensinar e proporcionar minha primeira experiência com laboratórios de pesquisa.

Agradeço ao Prof. **Jackson Roberto Eleotério** por me receber e auxiliar nos ensaios realizados no Laboratório de Processos de Industrialização da Madeira – LAPIM, do Departamento de Engenharia Florestal da FURB, campus 2 em Blumenau.

Obrigado ao GIEM e a Prof^a. **Ângela do Valle**, por disponibilizar uma das ferramentas essenciais para a concretização dos meus ensaios.

Grato ao meu colega de mestrado e hoje grande amigo **Mário Antonio Pinto da Silva Junior**, por todo apoio e aprendizado.

Obrigado à técnica **Juliana Siqueira** por me acompanhar e me auxiliar nos ensaios em laboratório e a toda equipe do Laboratório de Pesquisas em Painéis de Madeira - LAPPESC. Obrigado **Camila Alves, Luis Duarte e Gustavo Teles**. Obrigado ao Departamento de Engenharia Florestal do CAV, UDESC campus de Lages ao qual estão vinculados.

Agradeço ao nosso Laboratório de Construção e Materiais - LABCOM. Obrigado **Leonardo Coelho, Talitha Italia, Matheus Zanghelini e Jônathas Mirlla** e ao Departamento de Engenharia Florestal do CAV, UDESC campus de Lages.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC por me proporcionar a oportunidade e o privilégio de cursar o mestrado em uma das melhores universidades do país.

Agradeço à empresa parceira da pesquisa por serem sempre solícitos, me proporcionando os recursos e a oportunidade de vivenciar uma experiência cotidiana em uma indústria produtora de tecnologia construtiva em madeira. Obrigado aos Engenheiros **Matheus Floriani**, **Gisele Paim**, **Mayara Lopes**, **Cristiane Pires** e **Bibiane Barp**, aos Arquitetos **Patrícia de Matia** e **Maykon Lohmam** a técnica **Denise Santos**, e os demais colaboradores da produção, agradeço pela receptividade, acolhimento e todo ensinamento.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço fortemente a todos, foram fundamentais para a minha chegada até aqui!

RESUMO

A tecnologia de madeira engenheirada fornece produtos de origem renovável para aplicação no setor de construção civil como o Laminated Veneer Lumber (LVL). Ainda que de origem norte-americana, atualmente, o LVL tem sido industrializado em território brasileiro. Uma empresa catarinense, na avaliação de seu próprio produto, identificou que as chapas de LVL apresentavam 7% de rejeição na inspeção final, devido a problemas de fabricação, em ordem decrescente de importância, relativos a: espessuras de painéis menores ou maiores que a especificação, descolamento de lâminas e formação de vácuos no miolo do produto “estourado”. A origem desses problemas precisava ser encontrada para que eles pudessem ser poder sanados e a qualidade das chapas produzidas aprimoradas. Assim, esta pesquisa tem como objetivo avaliar o processo produtivo e as propriedades físico-mecânicas das chapas laminadas e da madeira utilizada como sua matéria-prima na produção das chapas de LVL. Para a avaliação do processo produtivo, foram feitas revisão aprofundada de literatura sobre o tema e observações in loco do processo produtivo. Usaram-se ferramentas gráficas para gestão de processos e registros de imagens fotográficas para a identificação do processo produtivo da empresa. A determinação das propriedades físico-mecânica da madeira e das chapas de LVL produzidas pela empresa foram determinadas em laboratórios de instituições parceiras. A avaliação do processo produtivo do LVL indicou que a origem dos problemas de fabricação está relacionada ao processo de colagem, que ocorre entre as etapas de montagem e de prensagem a quente. A não delaminação dos corpos de prova, em testes de laboratório atribui boa qualidade ao material comercializado e propriedades físico-mecânicas satisfatórias para uso construtivo. Porém nota-se a necessidade de melhorias no processo produtivo por meio do cumprimento dos parâmetros mínimos de garantia da qualidade das chapas de LVL.

Palavras-chave: Fabricação; Madeira; *Laminated Veneer Lumber*; LVL; Construção civil.

ABSTRACT

An engineered wood technology provides renewable products for the construction sector, such as Laminated Veneer Lumber (LVL). Although of North American origin, LVL has currently been industrialized in the Brazilian territory. A company from Santa Catarina state, evaluating its own product, identified that the LVL panels have shown 7% rejection in the final inspection, due to the following manufacturing problems: panel thicknesses smaller or larger than specification, veneer delamination and voids formation in the panel core. The origin of these problems needed to be found so that they could be eliminated and the quality of the produced panels could be improved. This research aims to evaluate the production process and the physical-mechanical properties of laminated panels and the wood used as raw material in the company production. A comprehensive literature review was conducted on the subject and the production process was evaluated on-site. Graphical tools for process management and photographic image records were employed to identify the company production process. The determination of the physical-mechanical properties of wood and LVL panels produced by the company was carried out in laboratories of partner institutions. The evaluation of the production process indicated that the origins of the manufacturing problems are related to the gluing process, which occurs between the sheet assembly and hot pressing stages. The non-existence of delamination of the specimens, in laboratory tests, ensured the good quality of the commercialized material and adequate physical-mechanical properties for construction use. However, the production process can be improved by complying with the minimum technical parameters to guarantee the quality of LVL panels.

Keywords: Manufacturing; Wood; Laminated Veneer Lumber; LVL; Building construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma dos passos da pesquisa	18
Figura 2-Produtos de LVL	21
Figura 3- Laminação de toras.....	33
Figura 4- Classificação das lâminas de Pinus sp.	35
Figura 5- Aplicação de preservação em autoclave (método célula cheia).	39
Figura 6- Prensagem de junção das lâminas	42
Figura 7- Simbologia para fluxograma de processos produtivos da ANSI	46
Figura 8- Corpos de prova na câmara de estabilização do teor de umidade	55
Figura 9- Máquina de teste universal EMIC DL-30000.....	55
Figura 10- Layout da fábrica de chapas de LVL.....	58
Figura 11- Processo de fabricação das chapas de LVL analisado in loco	59
Figura 12- Mapofluxograma do processo de produção das chapas de LVL	60
Figura 13- Fluxograma do processo de produção do LVL	63
Figura 14- Toras (a), tapete de lâminas (b) e guilhotinagem de lâminas (c).	67
Figura 15- Estocagem das lâminas de madeira	69
Figura 16- Secagem das lâminas de madeira	70
Figura 17- Pôster de orientação para classificação.....	72
Figura 18- Lâminas classificadas por aparência superficial	72
Figura 19- Medidor de umidade para madeira portátil – M51	73
Figura 20- Lâminas secas, separadas e empilhadas	74
Figura 21- Aplicação de tratamento preservante em autoclave: autoclave (a), lâminas que receberão tratamento (b) e lâminas tratadas (c).....	75
Figura 22- Aplicação do adesivo por rolo (a) e montagem das chapas (b)	76
Figura 23- Prensagem a frio e inspeção de cola	78
Figura 24- Prensa de prensagem a quente	79
Figura 25- Desenho da emenda (local b, l e t)	81
Figura 26- Teste para determinação da resistência à compressão paralela e perpendicular às fibras da madeira de Pinus taeda	85
Figura 27- Gráfico de força × deslocamento na testagem de flexão	88
Figura 28- Gráfico de força × deslocamento na compressão paralela às fibras.....	89
Figura 29- Corpos de prova para o teste (a) e após o teste de delaminação (b)	90
Figura 30- Gráfico de força × deslocamento por tração nas emendas dentadas	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Espécies utilizadas na produção de chapas de LVL	23
Quadro 2- Adesivos de madeira categorizados de acordo com seu desempenho estrutural previsto em níveis de variação da exposição ambiental.	26
Quadro 3- Características intrínsecas da madeira	36
Quadro 4- Quadro de ensaios para caracterização da madeira maciça e das chapas de LVL	54
Quadro 5- Parâmetros utilizados pela empresa, indicados na literatura e recomendações para melhoria	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Valores de MOE, MOR e densidade da madeira de Pinus taeda.	24
Tabela 2- Valores médios das propriedades físico-mecânicas de madeiras de Pinus spp.	25
Tabela 3- Valores médios das propriedades físico-mecânicas do LVL	29
Tabela 4- Uso de fenol-formaldeído na produção de chapas de LVL com Pinus spp.	41
Tabela 5- Parâmetros das dimensões dos entalhes e grau de enfraquecimento	44
Tabela 6- Critérios de classificação visual das lâminas adotados pela empresa de chapas de LVL são baseados na norma americana PS1-19	71
Tabela 7- Parâmetros da pressão de colagem usados pela empresa produtora de chapas de LVL.....	82
Tabela 8- Propriedades físico-mecânica da madeira Pinus taeda	83
Tabela 9- Valores resultantes do ensaio de caracterização físico-mecânica da chapa de LVL de Pinus taeda.	87
Tabela 10- Resultados do ensaio de flexão estática (MOE e MOR)	87
Tabela 11- Valores das resistências ao cisalhamento na linha cola	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
LVL	<i>Laminated Veneer Lumber/</i> Laminado de Lâminas Paralelas
FSC	<i>Forest Stewardship Council</i>
PLP	Painéis de Lâminas Paralela
PF	Fenol-Formaldeído
PRF	Fenol-Formaldeído com Resorcinol
PIB	Produto Interno Bruto
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
MLC	Madeira Lamelada Colada
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
ITP	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
CCA	<i>Chromated Copper Arsenate/</i> Arseniato de Cobre Cromatado
CPs	Corpos de Prova
LAC	Lenho Anormal de Compressão
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
MFV	Mapeamento do Fluxo de Valor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO GERAL	19
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	<i>LAMINATED VENEER LUMBER (LVL)</i>	21
2.1.1	Madeira para a produção de LVL	22
2.1.2	Propriedades físico-mecânicas da madeira para a produção do LVL ..	24
2.1.3	Adesivos para colagem de produtos de madeira	26
2.1.4	Fatores que influenciam o processo de colagem	27
2.1.4.1	<i>Porosidade da madeira</i>	27
2.1.4.2	<i>Viscosidade do adesivo</i>	27
2.1.4.3	<i>Teor de sólidos no adesivo</i>	28
2.1.4.4	<i>Potencial hidrogeniônico-pH do adesivo</i>	28
2.1.4.5	<i>Tempo de gelatinização do adesivo</i>	28
2.1.5	Propriedades físico-mecânicas do produto de LVL	29
2.2	PATOLOGIAS NA MADEIRA E EM CHAPAS DE LVL	29
2.3	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO LVL.....	31
2.3.1	Recebimento das toras de madeira	31
2.3.2	Cozimento de toras	31
2.3.3	Laminação de toras	32
2.3.4	Guilhotinagem das lâminas	33
2.3.5	Secagem de lâminas	34
2.3.6	Classificação das lâminas	34
2.3.7	Tratamento preservante	38
2.3.8	Sobreposição das lâminas e montagem das chapas	40
2.3.9	Colagem das lâminas	40
2.3.10	Prensagem	42
2.3.11	Acabamento das chapas	43
2.3.12	União de chapas	44
2.4	METODOLOGIA DE MAPEAMENTO DE PROCESSO PRODUTIVO.....	44
2.4.1	Fluxograma de processos	45

2.4.2	Mapofluxograma	46
2.5	MÉTODOS DE ENSAIO E NORMAS PARA A CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DA MADEIRA.....	47
2.6	MÉTODOS DE ENSAIO E NORMAS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECANICA DO LVL.....	47
3	MÉTODO DA PESQUISA.....	49
3.1	MAPEAMENTO DO PROCESSO PRODUTIVO DO LVL	49
3.1.1	Determinação da infraestrutura e <i>layout</i> da fábrica.....	49
3.1.2	Determinação do fluxo de produção das chapas de LVL.....	50
3.1.3	Levantamento em campo das etapas e dos parâmetros de produção das chapas de LVL	50
3.1.4	Avaliação do mapeamento	50
3.1.5	Diagnóstico do processo produtivo das chapas de LVL	51
3.2	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA E DA CHAPA DE LVL.....	51
3.2.1	Avaliação das propriedades físico-mecânica da madeira.....	51
3.2.2	Avaliação físico-mecânica da chapa de LVL	52
3.2.3	Material testado.....	52
3.2.4	Amostras e corpos de prova.....	53
3.2.5	Acondicionamento dos corpos de prova.....	54
3.2.6	Ensaio para a determinação das propriedades físico-mecânicas	55
3.3	TRATAMENTO DOS DADOS DO MAPEAMENTO DO PROCESSO PRODUTIVO DA CHAPA DE LVL	56
3.4	TRATAMENTO DOS DADOS DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA MACIÇA E DA CHAPA DE LVL	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1	MAPEAMENTO DO PROCESSO PRODUTIVO DA CHAPA DE LVL	57
4.1.1	Infraestrutura e <i>layout</i> da fábrica	57
4.1.2	Fluxo da produção das chapas de LVL.....	58
4.1.3	Processo de fabricação das chapas de LVL.....	62
4.1.4	Avaliação do processo de fabricação das chapas de LVL.....	63
4.1.4.1	<i>Fase 1- Processamento das toras de madeira</i>	<i>64</i>
a)	Recebimento, inspeção e armazenamento de toras	64
b)	Cozimento de toras	65

c)	Laminação e guilhotinagem das lâminas.....	66
4.1.4.2	<i>Fase 2 - Produção das chapas de LVL</i>	68
a)	Estocagem e secagem das lâminas.....	68
b)	Classificação e inspeção do teor de umidade das lâminas	71
c)	Organização das lâminas de acordo com as diferentes classes de qualidade para a montagem das chapas.	73
d)	Tratamento preservante e secagem de lâminas tratadas.....	74
e)	Aplicação do adesivo e montagem das chapas	76
f)	Prensagem a frio (pré-prensagem) e inspeção de cola.....	77
g)	Prensagem a quente e inspeção de colagem	79
4.1.4.3	<i>Fase 3 - acabamento das chapas de LVL</i>	80
a)	Calafetação, esquadreamento e lixamento da chapa.....	80
b)	União de chapas (<i>finger joint</i>).....	81
c)	Inspeção da qualidade, reparo da chapa, embalagem e despacho do produto acabado	82
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DA MADEIRA <i>PINUS TAEDA</i> UTILIZADA NA PRODUÇÃO DA CHAPA DE LVL	83
4.2.1	Densidade aparente	83
4.2.2	Ensaio de estabilidade dimensional	84
4.2.3	Resistências à compressão paralela e perpendicular às fibras	85
4.2.4	Dureza Janka	86
4.2.5	Resistência ao fendilhamento	86
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE LVL	86
4.3.1	Relação carga x deslocamento na flexão estática (<i>edgewise</i>)	87
4.3.2	Módulos de elasticidade e de ruptura à flexão (MOE e MOR)	88
4.3.3	Resistência à compressão paralela às fibras	89
4.3.4	Resistência ao cisalhamento das linhas de cola	89
4.3.5	Delaminação nas linhas de cola	90
4.3.6	Resistência à tração das emendas dentadas	91
4.4	DIAGNÓSTICOS E RECOMENDAÇÕES	91
4.4.1	Diagnóstico do processo produtivo do LVL	95
4.4.2	Considerações sobre a madeira de <i>Pinus taeda</i>	95
4.4.3	Considerações sobre a chapa de LVL	96
5	CONCLUSÕES	97

REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE A – FORMULÁRIO APLICADO <i>IN LOCO</i>	109
APÊNDICE B - QUADRO DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	111
APÊNDICE C – QUADRO DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO LVL	114
APÊNDICE D – TABELA DOS DADOS AVALIADOS NO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA (MOE E MOR)	117
APÊNDICE E – TABELA DOS DADOS AVALIADOS NO ENSAIO DE RESITÊNCIA AO CISALHAMENTO DA LINHA DE COLA.....	118
APÊNDICE F – EQUAÇÕES PARA TRATAMENTO DOS DADOS RESULTANTES NOS RESPECTIVOS ENSAIOS (ABNT NBR 7190, 2022; ABNT NBR 17002, 2021; ABNT NBR 12466-1, 2012)	119

1 INTRODUÇÃO

A madeira tem sido amplamente utilizada na construção civil. A resistência mecânica da madeira serrada estrutural é um dos principais benefícios do material quando se trata de estruturas com comprimentos que não podem ser alcançados por outros materiais construtivos tradicionais (BENOIT *et al*, 2017).

A madeira possui variadas propriedades construtivas em razão de sua alta relação resistência/massa. A qualidade dos produtos de madeira engenheirada é garantida por um processo industrial de fabricação do material e por matérias-primas selecionada. O material desenvolvido deve ser compatível com as resinas de revestimento e colagem (MARTINI, 2013; WEI *et al*, 2019).

Com maior reconhecimento do material na construção civil, o *Laminated Veneer Lumber* (LVL) é um produto de madeira engenheirada, empregado na concepção de aplicações estruturais permanentes e substitui o uso da madeira serrada. O LVL aplicado como produto de construção civil na estrutura de vigas, ripas, caibros e entre outros sistemas estruturais possui propriedades que eliminam deficiências relacionadas a rachaduras, nós, tensão de crescimento e comprimento limitado do produto de madeira (BEKIR, 2014).

A empresa que fabrica chapas de LVL está instalada na cidade de Lages-SC. Ela produz chapas de *Laminated Veneer Lumber* (LVL) ou, como nomeado no Brasil, Painel de Lâminas Paralelas (PLP), confeccionadas com madeira 100% oriunda de florestas plantadas de *Pinus spp*. As chapas servem de base para a produção de vigas, caibros, ripas, forros, paredes e pisos usados na construção civil. Em uma análise prévia realizada pela própria empresa, foi constatado o rejeito de 7% do produto na inspeção final, devido aos seguintes defeitos, em ordem decrescente de importância, as principais problemáticas: espessuras de painéis menores ou maiores que a especificação, descolamento de lâminas e formação de vácuos no miolo do produto “estourado” (SANTOS, MOARES e TEREZO, 2022). Esses problemas precisam ser sanados, a fim de aprimorar a qualidade das chapas produzidas.

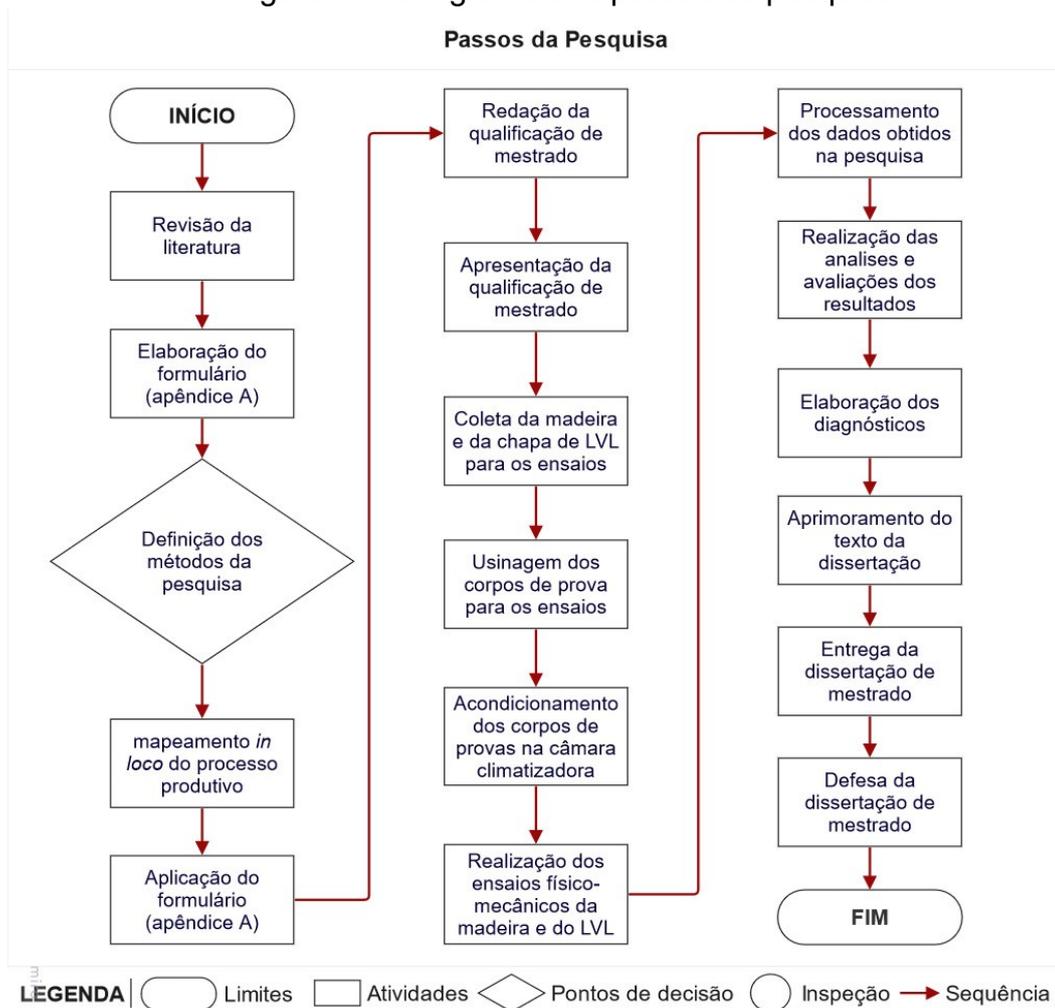
A produção de chapas de LVL consiste em uma sequência básica de etapas compostas pela: laminação de toras, secagem de lâminas, classificação de lâminas, aplicação de adesivo, montagem dos compósitos, prensagem a frio, prensagem a quente, esquadreamento e acabamento. Todo processo de produção precisa seguir

rigorosamente padrões de qualidade estabelecidos por normas e por manuais técnicos que parametrizam métodos de trabalhabilidade do material utilizado para a fabricação (MULLER, 2009).

Métodos de mapeamento do processo produtivo podem ser aplicados como ferramenta de conhecimento da produção. Eles possibilitam identificar potenciais fragilidades que interfiram na qualidade do produto fabricado durante sua manufatura. O monitoramento do processo, realizado *in loco*, e a sua documentação possibilitam o registro e levantamento de dados para sua avaliação (BORBA, 2021).

Como forma de melhor detalhar os passos seguidos para a elaboração desta pesquisa, a Figura 1 apresenta o fluxograma sequencial das atividades realizadas durante todo período de estruturação do estudo.

Figura 1- Fluxograma dos passos da pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo dessa pesquisa é a avaliação do processo produtivo e das propriedades físico-mecânicas da chapa de *Laminated Veneer Lumber Pinus taeda*.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- a. mapear as etapas de fabricação da chapa de LVL;
- b. avaliar os parâmetros técnicos usados na produção das chapas de LVL;
- c. caracterizar simplificadaamente as propriedades físico-mecânicas da madeira utilizada na produção do LVL;
- d. caracterizar as propriedades físico-mecânicas da chapa-mãe de LVL;
- e. diagnosticar os possíveis fatores que interferem na qualidade da chapa de LVL acabada e propor recomendações de melhoria.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este documento está estruturado em cinco capítulos. O primeiro aborda a Introdução do problema em estudo. O segundo realiza uma Revisão da Literatura sobre tópicos relevantes. O terceiro descreve as metodologias de coleta e avaliação dos dados. O quarto analisa os Resultados e discussões da pesquisa. O quinto e último apresenta as Conclusões do trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura sobre: *Laminated Veneer Lumber* (LVL) e o seu processo de fabricação, as metodologias para caracterizar o produto de LVL e a matéria-prima utilizada na sua produção, as patologias em elementos de madeira e o seu tratamento preservante, bem como, os métodos de mapeamento e de análises de problemáticas aplicados em processos produtivos.

2.1 LAMINATED VENEER LUMBER (LVL)

O produto de madeira engenheirada, conhecido como *Laminated Veneer Lumber* (LVL) ou madeira laminada folheada (MLF) ou Painel de Lâminas Paralelas (PLP), é feito de folheado de madeira colado junto com grão orientado paralelamente ao comprimento do painel (Figura 2). Em comparação com a madeira maciça, o LVL apresenta melhor estabilidade dimensional, possibilita a fabricação de painéis com grandes dimensões em relação ao produzido convencionalmente e apresenta maior módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR). Segundo Purba *et al.* (2019), o potencial de resistência mecânica do produto laminado é comparado às resistências apresentadas pelo concreto e pelo aço.

Figura 2-Produtos de LVL



Fonte: LVL Handbook Europe (2019)

O LVL é fácil de furar, cortar, apertar e encaixar, com apenas o uso de ferramentas de trabalho utilizadas no manuseio de madeira convencional. De acordo com o LVL HANDBOOK EUROPE (2019), seus componentes são portáteis devido ao

seu peso, que torna o produto laminado mais leve, com melhor trabalhabilidade e fácil manuseio. Além disso, é fácil de combinar com outras espécies de madeiras, produtos e materiais de construção civil.

Os produtos de LVL apresentam qualidades construtivas devidas às suas propriedades físicas e mecânicas uniformes em termos de flexibilidade dimensional. Esses aspectos atribuem ao material características físico-mecânicas superiores ao compensado, à madeira serrada em geral e até às vigas lameladas coladas devido a esses fatores. O LVL é usado na construção em aplicações estruturais e não estruturais, produz painéis, pisos, vigas e outros componentes construtivos (ZEUG, BEZAMA e THRÄN, 2022).

De acordo com *LVL Handbook Europe* (2019) e *Wei et al.* (2019), os folheados que formam a chapa de LVL possuem de 2,5 a 3,2 mm de espessura, com todas as camadas de lâminas posicionadas paralelamente ao comprimento e coladas por adesivos fenólicos resistentes às intempéries. São produzidas chapas na configuração contínua ou nas dimensões de painéis compensados convencionais. Essas chapas possuem dimensões de 1200 × 2400 mm e espessuras entre 20 e 40 mm. Os painéis compensados seguem inicialmente as mesmas medidas, com possibilidade de variação no seu comprimento que pode chegar em até 25 m.

Entre as principais vantagens do uso de produtos laminados como elementos construtivos é a possibilidade do aproveitamento de toras com diferentes diâmetros para produção de painéis de madeira, potencialmente utilizados na concepção de edifícios habitacionais de configuração vertical. As chapas laminadas possibilitam reduzir limitações de dimensão em produtos de madeira, permite a fabricação de variados produtos construtivos e proporciona maior liberdade projetual para profissionais do setor de construção civil (WEI *et al.*, 2019).

2.1.1 Madeira para a produção de LVL

As madeiras usadas para a produção de LVL podem ser da classe das folhosas e das coníferas (Quadro 1), de acordo com o tipo de lâmina faqueada ou laminada. As indústrias de produtos laminados têm optado por espécies oriundas de reflorestamentos, como o pinus, devido à diminuição da oferta de madeira com

grandes diâmetros provenientes de florestas nativas, seja por motivos ecológicos ou por esgotamento causado pela exploração indiscriminada (AGUIAR, SOUZA e SHIMIZU, 2014 e ATHANÁZIO-HELIODORO, LARA-PALMA e BALLARIN, 2020).

Quadro 1- Espécies utilizadas na produção de chapas de LVL

Classificação	Nome científico	Nome comum	Tipo de lâmina	Referências
Folhosas	<i>Acacia mangium</i>	Acácia	Laminado	SASAKI <i>et al.</i> (1993)
	<i>Albizia falcata</i>	-		
	<i>Acer rubrum</i>	Ácer ou bordo		KIMMEL <i>et al.</i> (1994)
	<i>Cryptomeria japonica</i>	Sugi		SASAKI e KAWAI (1994)
	<i>Eucalyptus deglupta</i>	Eucalipto		SASAKI <i>et al.</i> (1993)
	<i>Gmelina arborea</i>	Gmelina		
	<i>Liquidambar styraciflua</i>	Liquidâmbar, Árvore-do-âmbar		
	<i>Liriodendron tulipifera</i>	Tulipeiro	HOOVER <i>etal.</i> (1987); KIMMEL <i>etal.</i> (1994); MURPHEY <i>et al.</i> (1967); CHUI <i>et al.</i> (1994)	
<i>Quercus alba</i>	white oak (carvalho branco)	Faqueado	LUTZ (1944) citado por SCHAFFER <i>et al.</i> (1972 ^a)	
Coníferas	<i>Abies grandis</i>	Grande Abeto	Laminado	RASMUSSEN (1994)
	<i>Picea sitchensis</i>	sitka spruce	-	LUXFORD, citado por LAUFENBERG (1982)
	<i>Pinus contorta</i>	Pinus	-	HESTERMAN e GORMAN (1992)
	<i>Pinus elliotii</i>		Laminado	KRETSCHMANN <i>et al.</i> (1993)
	<i>Pinus palustris</i>		Faqueado	KOCH (1964 ^a)
	<i>Pinus taeda</i>			KIMBALL (1968)
		KOCH e WOODSON (1968)		
		KRETSCHMANN <i>et al.</i> (1993)		
	<i>Populus spp</i>	Populus	-	CHUI <i>et al.</i> (1994)
<i>Pseudotsuga Menziessii</i>	Douglas - fir	-	BOHLEN (1972); KRETSCHMANN <i>et al.</i> (1993); JOKERST (1972).	

Fonte: Matos (1997) (adaptado pelo autor, 2021)

Segundo Santos *et al.* (2015), entre as espécies existentes com possibilidade de uso na produção de chapas laminadas, a madeira *Pinus spp*, de florestas plantadas, é a principal matéria-prima utilizada no setor de produção de laminados em escala industrial.

Para uso na indústria de laminados, é admissível o uso de toras da espécie *Pinus taeda* L, com ciclos de produção em 15-20 anos de idade após o seu plantio e diâmetro da tora entre 15 a 30 cm. Entretanto, essa faixa de idade das toras resulta em uma elevada proporção de madeira juvenil, sendo preferível o uso da madeira adulta com 30 anos de idade por apresentar maior estabilidade dimensional, menor coeficiente de anisotropia e melhor desempenho mecânico em relação a madeiras com idade inferior (BENOIT *et al.*, 2017; VIVIAN *et al.*, 2022).

2.1.2 Propriedades físico-mecânicas da madeira para a produção do LVL

A Tabela 1 apresenta valores da densidade, dos módulos de elasticidade na flexão (MOE) e de ruptura (MOR) da madeira de *Pinus taeda* adulta e juvenil. As médias observadas do MOE e do MOR na madeira adulta, em relação à juvenil, foram 54 e 47% superiores, respectivamente. A principal causa da notável diferença na rigidez e na resistência entre as madeiras categorizadas como adulta e relação as juvenis não é apenas a variação na densidade, o maior ângulo fibrilar dos traqueídes da madeira juvenil é responsável por essas qualidades (BALLARINI e PALMAII, 2003).

Tabela 1-Valores de MOE, MOR e densidade da madeira de *Pinus taeda*.

	Madeira Adulta			Madeira Juvenil		
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Dens. 12% (kg/m ³)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Dens. 12% (kg/m ³)
Mínimo	11820	77,12	586	5112	43,45	439
Máximo	21139	164,22	776	16641	125,08	699
Média	16730	127,62	674	10894	87,03	536
CV (%)	12,7	16,6	7,99	22,3	21,5	10,7
s	2,117	21,2	0,054	2,426	18,71	0,058

Fonte: Ballarini e Palmai (2003)

Segundo Gabriel (2007), as principais propriedades físico-mecânicas usadas para a caracterização das madeiras para a produção do LVL são: massa específica aparente, resistência à compressão paralela e perpendicular às fibras, resistência à tração nas emendas dentadas, os módulos de elasticidade à compressão paralela e perpendicular às fibras, dureza e fendilhamento. A Tabela 2 apresenta os valores médios dessas propriedades para a madeira *Pinus spp* usada na produção das chapas de LVL.

Tabela 2- Valores médios das propriedades físico-mecânicas de madeiras de *Pinus spp.*

Ensaio	Propriedade	Fonte	Média	DP	CV
Densidade (12%)	Aparente (kg/m ³)	ALMEIDA <i>et al.</i> (2014)	520	-	-
		LIZ E CUNHA (2020)	436	-	-
		MUSTEFAGA <i>et al.</i> (2019)	410	-	-
Estabilidade dimensional	Retração radial	TRIANOSKI <i>et al.</i> (2013)	3,38	-	-
		LIZ E CUNHA (2020)	3,88	-	-
		RIBEIRO <i>et al.</i> (2019)	4,67	-	-
	Retração tangencial	TRIANOSKI <i>et al.</i> (2013)	6,44	-	-
		LIZ E CUNHA (2020)	5,71	-	-
		RIBEIRO <i>et al.</i> (2019)	5,89	-	-
	Inchamento radial	RIBEIRO <i>et al.</i> (2019)	4,92	-	-
	Inchamento tangencial	RIBEIRO <i>et al.</i> (2019)	6,29	-	-
	Variação volumétrica	TRIANOSKI <i>et al.</i> (2013)	10,64	-	-
		LIZ E CUNHA (2020)	9,65	-	-
Compressão paralela às fibras	Resistência à compressão paralela às fibras (MPa)	MUSTEFAGA <i>et al.</i> (2019)	28	-	-
		TRIANOSKI <i>et al.</i> (2014)	37	-	-
		SANTINI <i>et al.</i> (2000)	29	-	-
	Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (MPa)	MUSTEFAGA <i>et al.</i> (2019)	7532	-	-
		TRIANOSKI <i>et al.</i> (2014)	12432	-	-
Compressão perpendicular às fibras	Resistência à compressão perpendicular às fibras (MPa)	MAYARD <i>et al.</i> (2022)	10	-	-
		ANDRIONI (2019)	10	-	-
	MUSTEFAGA <i>et al.</i> (2019)	7	-	-	
	Módulo de elasticidade à compressão perpendicular às fibras (MPa)	MAYARD <i>et al.</i> (2022)	4184	-	-
		ANDRIONI (2019)	5944	-	-
MUSTEFAGA <i>et al.</i> (2019)	3410	-	-		
Dureza	Axial (MPa)	LIZ E CUNHA (2020)	282	-	-
		MUSTEFAGA <i>et al.</i> (2019)	240	-	-
	Tangencial (MPa)	LIZ E CUNHA (2020)	245	-	-
		MUSTEFAGA <i>et al.</i> (2019)	575	-	-
	Radial (MPa)	LIZ E CUNHA (2020)	195	-	-
MUSTEFAGA <i>et al.</i> (2019)		208	-	-	
Fendilhamento	Resistência (MPa)	MASCARENHAS <i>et al.</i> (2013)	0,4	-	-
		BORGES (2017)	0,5	-	-
Tração nas emendas dentadas	Tensão máxima (MPa)	NOGUEIRA (2017) (Grupo 1)	35,1	9,00	25,6
		NOGUEIRA (2017) (Grupo 3)	37,9	7,25	17,1

CPs: corpos de prova; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação. “ - “: Resultados não considerados na pesquisa

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Produtos de LVL produzidos de madeiras coníferas de baixa densidade propiciam uma melhor relação forças/peso, apresentam baixo teor de resina, o que torna a matéria-prima vantajosa na fabricação de laminados. A madeira com maior densidade propicia ao produto maiores propriedades mecânicas (LVL HANDBOOK EUROPE, 2019).

Haselein e Pauleski (2004) relatam que as madeiras usadas para a produção do LVL fornecem lâminas com baixa massa específica, que demonstram melhor estabilidade dimensional quando expostas a variações de umidade e facilitam a colagem entre as lâminas ao produzir tensões menores nas linhas de cola.

2.1.3 Adesivos para colagem de produtos de madeira

Os adesivos usados em elementos de madeira podem ser classificados em: estrutural, semi-estrutural e não estrutural (USDA, 1999), conforme apresentado no Quadro 2. Os adesivos estruturais, sem restrições de uso, compreendem os adesivos fenol-formaldeído, resorcinol-formaldeídos, fenol-resorcinol-formaldeído, polímero de emulsão/isocianato, melanina-formaldeído. Enquanto que os adesivos estruturais, de uso externo com restrições, consistem naqueles a base de melanina-ureia-formaldeído, isocianato e epóxi. Os adesivos estruturais de uso interno são a uréia-formaldeído e a caseína. Para aplicações semi-estruturais, os adesivos para aplicação externa com limitações, são: o polivinil acetano e o poliuretano. Além disso, quando se trata para uso não-estrutural de aplicação no interior os adesivos utilizados são a base de: polivinil acetano, animal, elastômeros de construção, elastômeros de contato e o *hot-melt*.

Quadro 2- Adesivos de madeira categorizados de acordo com seu desempenho estrutural previsto em níveis de variação da exposição ambiental.

Tipos de adesivo	Local de uso	Adesivo utilizado
Estrutural	Uso exterior, sem restrições	Fenol-formaldeído
		Resorcinol- formaldeído
		Fenol-resorcinol-formaldeído
		Polímero de emulsão/isocianato
		Melanina-formaldeído
	Uso exterior, com restrição	melanina-ureia-formaldeído
		isocianato
		epóxi
	Interior	uréia-formaldeído
caseína		
Semi-estrutural	Uso exterior, com limitações	polivinil acetano
		poliuretano
Não-estrutural	Interior	polivinil acetano
		animal
		elastômeros de construção
		elastômeros de contato
		<i>hot-melt</i>

Fonte: USDA (1999)

2.1.4 Fatores que influenciam o processo de colagem

Os principais parâmetros que influenciam na eficiência do processo de colagem de produtos de madeira é: a porosidade da madeira, a viscosidade da cola, o teor de substâncias sólidas, o pH e o tempo de gelatinização do adesivo (CARVALHO *et al.*, 2015). Santos (2016) afirma que é crucial caracterizar os adesivos usados em produtos de madeira laminada, com o objetivo de identificar o seu comportamento durante o processo de colagem. Parâmetros desse tipo serão apresentados com maior destaque a seguir.

2.1.4.1 *Porosidade da madeira*

A melhoria da capacidade aderente da madeira é atribuída à sua porosidade. Em escala micrométrica, essa característica influencia na mobilidade e penetrabilidade da cola no material, relaciona os fatores de aberturas da madeira relativas à passagem dos líquidos adesivos e impacta significativamente no desempenho da colagem (IWAKIRI, 2005; LIMA *et al.*, 2007).

2.1.4.2 *Viscosidade do adesivo*

A viscosidade é a resistência ao fluxo livre que ocorre entre as camadas de uma matéria ou o que indica a existência de atrito entre as moléculas de um determinado fluido e que atua através do escoamento (SANTOS, 2016).

A alta viscosidade do adesivo ocasiona dificuldade na distribuição uniforme ou de espalhamento sobre o material, o que pode ocasionar uma penetração insuficiente na estrutura da madeira e provocar linha de cola espessa. Em contrapartida, a baixa viscosidade dos adesivos possibilita maior penetração e absorção pela madeira, o que provoca uma linha de cola fina em razão da dispersão do produto sobre o material. É necessário que haja um equilíbrio desse parâmetro, para que seja possível atribuir uma eficiente distribuição e penetração do adesivo (SANTOS, 2016; BIAZZON *et al.*, 2019).

2.1.4.3 *Teor de sólidos no adesivo*

O teor de sólidos é a quantidade de sólidos resinosos presente na estrutura do adesivo formado por componentes em estados sólido e líquido constituído de solventes orgânicos. Ele possibilita identificar a efetiva quantidade de adesivo que fica na linha de cola, uma vez que a água e outros materiais voláteis evaporam durante a prensagem. Para a adesivos como o fenol-formaldeído o teor de sólidos deve ser entre 48 e 51%. (IWAKIRI *et al.*, 2005; OLIVEIRA, 2016; SANTOS, 2016).

2.1.4.4 *Potencial hidrogeniônico-pH do adesivo*

O potencial hidrogeniônico-pH representa a concentração de íons dissociados de H⁺ e OH⁻ existentes, determinado pela leitura direta em pHmetro (STELLA, 2009). A composição de um adesivo para colagem de produtos de madeira não deve ultrapassar os limites mínimo entre 2,5 e máximo de 11. Essa ultrapassagem para abaixo ou acima podem provocar a degradação das fibras da madeira (IWAKIRI *et al.*, 2005 e SANTOS, 2016).

Santos (2016) afirma que a maioria da polimerização dos adesivos ocorre por meio de uma reação físicoquímica, a qual é frequentemente influenciada pelo pH. O adesivo de fenol-formaldeído é um exemplo em razão do seu processo de cura ocorrer em meio alcalino.

2.1.4.5 *Tempo de gelatinização do adesivo*

Iwakiri (2005) define o tempo de gelatinização do adesivo como sendo o período de transcorrido entre a sua preparação até a sua aplicação, no qual podem ser adicionados catalisadores, água, extensor e carga, em temperaturas pré-estabelecidas, para atingir a fase de máxima elasticidade e com textura gelatinosa.

Na gelatinização ocorre a reatividade do adesivo caracterizada pelo menor tempo de alcance até a fase de gel em posterior a mistura de todos os componentes da mistura. Isso permite uma adesão rápida entre o material colado e reduz o tempo de prensagem das lâminas de madeira. O tempo de gelatinização também depende da temperatura que influencia na reação de mistura entre os produtos que compõem a mistura e o grau de extensão do adesivo (SANTOS, 2016).

2.1.5 Propriedades físico-mecânicas do produto de LVL

As propriedades físicas e mecânicas dos produtos folheados são decorrentes do tipo de madeira usada na produção deste produto, do processo de fabricação rigoroso e do controle de qualidade e podem ser encontradas com valores bem dispersos (Tabela 3). Para LVL, fabricado com madeira de *Pinus*, o módulo de elasticidade na flexão (MOE) situa-se entre 5068 a 6939 MPa. Já o módulo de ruptura na flexão (MOR) encontra-se entre 25 a 89 MPa para produtos de laminados fabricados com madeira de *Pinus* (LIMA *et al.*, 2013; BULIGON *et al.*, 2015 e NIGUEIRA, 2017). Segundo por Bekir (2014), as propriedades mecânicas determinadas a partir de flexão estática do LVL são os principais índices para verificar a eficácia do produto.

A resistência média à compressão paralela às fibras as médias podem variar entre 36 a 49 MPa, enquanto que a resistência ao cisalhamento da linha de cola varia 3,0 a 3,7 MPa (LIMA *et al.*, 2013 e NOGUEIRA, 2017). Esta última é afetada, segundo Bekir (2014), pela quantidade de adesivo usado a densidade da madeira.

Tabela 3- Valores médios das propriedades físico-mecânicas do LVL

Ensaio	Propriedade	Fonte	Média	DP	CV
Flexão estática (<i>edgewise</i>)	MOE (MPa)	Lima <i>et al.</i> (2013)	5339	-	-
		Buligon <i>et al.</i> (2015)	5068	436	8
		Nogueira (2017)	6939	572	8
	MOR (MPa)	Lima <i>et al.</i> (2013)	74	-	-
		Buligon <i>et al.</i> (2015)	89	10	11
		Nogueira (2017)	25	3	12
Compressão paralela	Resistência à compressão paralela às fibras (MPa)	Lima <i>et al.</i> (2013)	48	-	-
		Nogueira (2017)	36	2	6
Cisalhamento	Resistência ao cisalhamento da linha de cola (MPa)	Nogueira (2017)	3,0	0,7	-
		Lima <i>et al.</i> (2013)	3,7	-	-
Delaminação	Linhas de Cola (%)	Nogueira (2017)	0,36	-	-

CPs: corpos de prova; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação. “ - “: Resultados não considerados na pesquisa

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

2.2 PATOLOGIAS NA MADEIRA E EM CHAPAS DE LVL

Uma das principais patologias encontradas na madeira é a presença de nós ocasionadas pela retirada dos galhos das árvores. A área total do nó é a razão da soma da circunferência projetada de todos os nós dentro de um produto de madeira

para a área total da seção transversal da peça. Essa especificação é usada para descrever como ela afeta as propriedades da madeira. A presença de nós e de buracos na madeira induz zonas de menor resistência mecânica (BENOIT *et al.*, 2017; PURBA *et al.*, 2019).

Em chapas de LVL, as principais patologias encontradas são: variação de espessuras fora da especificação, descolamento de lâminas e formação de vácuos no miolo do produto “estourado”. O principal motivador da variação de espessuras em chapas de LVL são as diferentes bitolas em uma mesma lâmina, as quais ocorrem em razão de instabilidade do torno faquiador durante o processo de faquamento, que não fornece uma laminação de corte uniforme (IWAKIRI, 2005; SANTOS, MORAES e TEREZO, 2022).

A descolagem das lâminas trata-se da patologia com maior ocorrência em produtos laminados. As principais causas do descolamento é a exposição às intempéries, a variação dimensional da madeira e do teor de umidade, problemas no processo de colagem e o uso de madeiras oriundas de diferentes espécies. Segundo Nogueira (2017), a delaminação média de descolagem entres as linhas de cola do LVL deve ser igual ou inferior a 0,36%. A formação de vácuos no miolo das chapas é um problema adicional no material laminado de madeira. A principal causa é a formação de bolsas de ar devido à quantidade excessiva de cola aplicada às lâminas durante a fase de prensagem a quente (SANTOS, 2008; TIMPONI, 2017; SANTOS, MOARES e TEREZO, 2022).

Segundo Ritter e Morrell (1990), Calil Jr. *et al.* (2006) e Tamponi (2017), os agentes bióticos (vivos) e abióticos (não vivos) são as duas principais causas da origem de deteriorações da madeira. Os agentes bióticos são os fungos, os insetos e os perfuradores marinhos, enquanto que os agentes abióticos são os agentes físicos, químicos, meteorológicos e o fogo. Os organismos causadores de biodeterioração em estruturas de madeira por apodrecimento ou por decomposição, causam patologias ao utilizar o material como fonte de alimento e como habitat (HIGHLEY e SCHEFFER, 1989; RITTER e MORRELL, 1990).

2.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO LVL

Muller (2009) e Zeug, Bezama e Thrän (2022) afirmam que o processo de fabricação do LVL é um sistema que possui várias etapas industriais. Ele é composto principalmente pelas seguintes etapas: recebimento, descascamento, cozimento em poço de vapor e laminação das toras, secagem, classificação e sobreposição das lâminas, montagem, colagem e prensagem da chapa, e por último acabamento do produto final.

Caso o LVL seja submetido a tratamentos químicos preservantes, surge uma nova etapa, a etapa de proteção das chapas contra os ataques de agentes causadores de patologias no material (LVL *HANDBOOK EUROPE*, 2019). Essas etapas do processo produtivo são descritas nas subseções a seguir.

2.3.1 Recebimento das toras de madeira

No momento em que as toras de madeira usadas como matéria-prima para a fabricação do LVL são recebidas, elas são inspecionadas para a detecção de possíveis defeitos, como nós, cores azuladas ou rachaduras. O objetivo dessa análise é eliminar anomalias que podem resultar em um baixo desempenho do material quando submetido aos maquinários durante o processo de fabricação de chapas laminadas (LVL *HANDBOOK EUROPE*, 2019).

Na etapa de recebimento, a fim de manter a qualidade das toras devem ser observados os seguintes procedimentos: as toras devem ser armazenadas em um local arejado e empilhadas por um curto período de tempo, o uso das toras deve acontecer por ordem de chegada na produção, para manter as cascas protetoras da madeira e o seu alto teor de umidade (IWAKIRI, 2005; BONDUELLE *et al*, 2006; MULLER, 2009).

2.3.2 Cozimento de toras

O objetivo do cozimento das toras é produzir lâminas com menor rugosidade devido ao amolecimento da madeira causado pelas temperaturas elevadas. A permanência de toras em altas temperaturas é o procedimento que melhora o

desempenho do torno de faqueamento durante a laminação, pois amolece o cerne e permite uma melhor eficiência de corte da faca e qualidade de acabamento da superfície cortada, além, de reduzir o tempo de secagem das lâminas sem comprometer a as propriedades físicas do material quando submetido ao processo de cozimento (LUTZ, 1978; Tanritanir *et al.* 2006).

Lutz (1978) descreve dois métodos de cozimento de toras: por imersão e por vapor. O cozimento por imersão envolve mergulhar as toras em tanques de água quente. Por outro lado, no cozimento por vapor, as toras são confinadas em ambiente fechado, colocadas sobre valas retangulares com água empoçada e aquecida em altas temperaturas. O vapor proporciona o cozimento da madeira confinada. Para Keinert Júnior e Alberto (1992), 60 °C é considerada a temperatura ideal para o cozimento de toras da espécie *Pinus taeda*, utilizada na fabricação de produtos de madeira compensada.

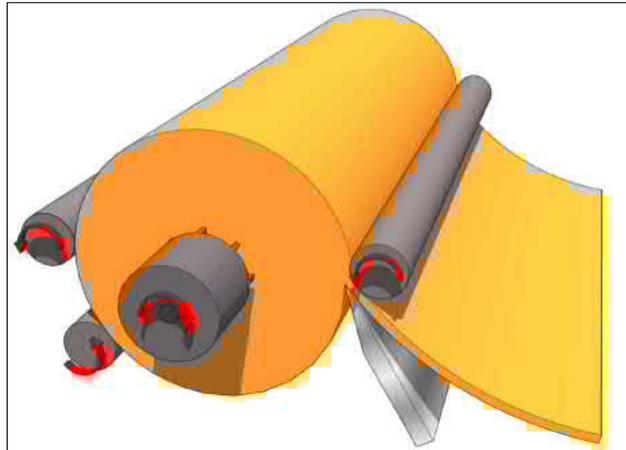
O método de aquecimento a vapor por lona é usado para a maioria dos cozimentos. No entanto, devido às enormes perdas de energias resultantes do processo, esse método é considerado ineficiente (TANRITANIR *et al.*, 2006). Além disso, o método não proporciona uma eficiente penetração do calor no interior da tora.

2.3.3 Laminação de toras

A laminação, de acordo com Iwakiri (2005), é o processo de obter um tapete contínuo de madeira com espessuras entre 2,5 e 4,0 mm. Isso é feito por meio do movimento de rotação da tora, que é fixada pelas bordas e encaixadas no conjunto faca/barra com pressão sobre elas.

O resultado final da laminação é fortemente impactado pelas técnicas de processamento da madeira. É necessário garantir uma boa afiação da lâmina de corte, a permanência constante da velocidade do faqueamento e o posicionamento da faca durante o procedimento de descascamento da tora, que pode variar entre 30 a 50 m/min. Para atribuir qualidade as lâminas utilizadas na produção de chapas em LVL, determina-se que o ângulo de afiação da faca esteja entre 18° a 27°, sendo 21° a regulagem referência para o desdobramento da tora de madeira (SELLERS, 1985; IWAKIRI, 2005; SANTOS *et al.*, 2015) (Figura 3).

Figura 3- Laminação de toras



Fonte: LVL Handbook Europe (2019)

De acordo com Santos *et al.* (2015), para o rendimento satisfatório na produção de lâminas com qualidade de uso, é fundamental a seleção da matéria-prima tomando como referência o tipo de uso que será atribuído ao produto laminado acabado. As lâminas são utilizadas para a formação de painéis em madeira laminada que suprem necessidades de uso superior ao empregado pela madeira maciça. (BONDUELLE *et al.*, 2006; MENDOZA *et al.*, 2018).

Interamnense (1998) e Bonduelle *et al.* (2006) descrevem que, para toras com diâmetros entre 28 e 30 cm, é considerado satisfatório o rendimento de laminação entre 48 a 50% de aproveitamento. Porcentagens acima disso aumentarão o rendimento da laminação, pois a faixa diamétrica, que começa na parte externa e termina no miolo da tora, será melhor aproveitada. É necessário que a tora possua qualidade volumétrica, retilinidade uniforme em seu formato e tenha sido cozida.

2.3.4 Guilhotinagem das lâminas

De acordo com Haselein e Pauleski (2004), após a laminação das toras, é feito o processo de guilhotinagem. Ele transforma o tapete contínuo laminado em lâminas individuais separadas com dimensões padrão para a fabricação dos painéis com 1200 mm × 3200 mm. A guilhotinagem das lâminas realizada pela empresa catarinense de chapas laminadas é diferente do aplicado por empresas da América do Norte e Europa. A empresa adota a fabricação de painéis com 1200 mm x 3200 mm, enquanto que em outros processos produtivos, o LVL é produzido continuamente e as chapas

de LVL são cortadas durante a etapa de produção (MATOS, 1997; HASELEIN e PAULESKI, 2004; MULLER, 2009).

2.3.5 Secagem de lâminas

Ao deixar o torno de laminação, as lâminas apresentam um alto teor de umidade que pode variar entre 40 a 100%. Esse alto teor de umidade prejudica a colagem das lâminas, diminui a resistência mecânica da madeira e torna o material vulnerável a ataques de microrganismos (*RAUTE ENGINEERED WOOD*, 1980; TOMASELLI, 1983). Portanto, elas devem passar por um processo de secagem.

Primeiramente, as lâminas são estocadas sobre plataformas elevadas, sem contato direto com o solo, para evitar altos teores de umidade. Após, as lâminas são conduzidas a uma secadora com o objetivo de reduzir a umidade do material para uma taxa de 3 a 8% (HASELEIN e PAULESKI, 2004).

Santos (2008) relata que o teor de umidade entre 7 e 8% evita a formação de bolhas a vapor em etapas posteriores de fabricação. Ele afirma que a temperatura ideal para secagem das lâminas de madeira de *Pinus taeda* deve ser de 80 a 165 °C com intervalos de tempo específicos de acordo com a espessura da madeira. Lâminas entre 1,0 e 3,2 mm secas pelo período mínimo de 20 min são expostas a temperaturas de secagem na câmara de ventilação de 90, 80, 70 e 60 °C (JÚNIOR, NUTTO e HIGA, 2013).

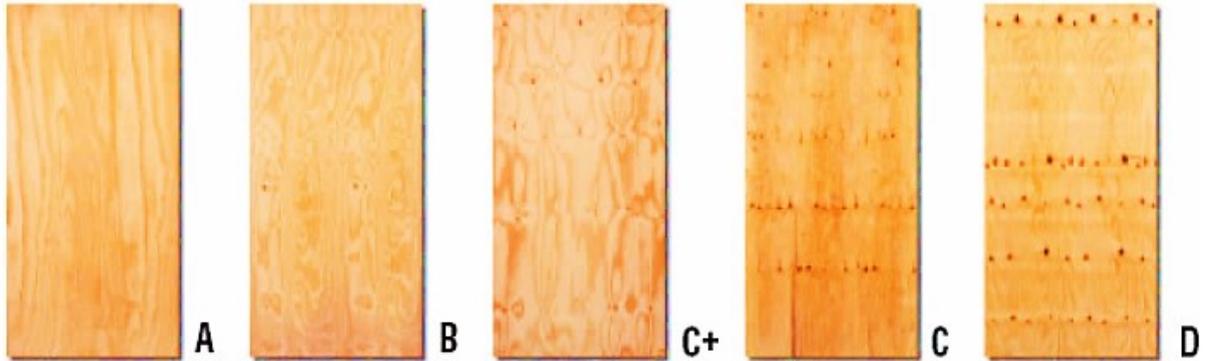
O método gravimétrico pode ser usado para determinar o teor de umidade das lâminas usando uma balança de precisão de 0,10 g e uma estufa a 103 + 2°C (HASELEIN e PAULESKI, 2004; *RAUTE ENGINEERED WOOD*, 1980 e TOMASELLI, 1983).

2.3.6 Classificação das lâminas

O objetivo da classificação de lâminas é definir padrões para a qualidade do material, incluindo o tipo, a quantidade e as dimensões dos defeitos. Isso é feito para garantir a resistência necessária para os tipos de produtos elaborados a partir da chapa-mãe, como vigas, caibros, ripas, forros e painéis (MULLER, 2009). De acordo com Matsunaga (1995), lâminas com qualquer tipo de defeito que possam prejudicar

a qualidade da colagem e, portanto, o produto final deve ser evitado. Como resultado, é aplicada uma inspeção para aferir a presença de defeitos possíveis de serem visualizados (Figura 4).

Figura 4- Classificação das lâminas de *Pinus sp.*



Fonte: Abimci (2002)

A classificação das lâminas de madeira em classes de qualidade pode ser realizada por métodos não-destrutivos de forma visual. A norma ABNT NBR ISO 2426-3:2006 estabelece critérios para esse tipo de classificação por aparência superficial da madeira compensada de *Pinus spp.*, os quais estão apresentados no Quadro 3. São estabelecidas 5 classes: A, B, C+, C e D que corresponde à níveis de defeitos e grau de qualidade das lâminas. A classe “A” é caracterizada pelas lâminas que não apresentam defeitos e possui maior qualidade, enquanto a classe “D” é caracterizada por maiores defeitos em quantidade e dimensões e possuir a menor qualidade de uso. Os parâmetros utilizados para classificar as lâminas dentro das 5 classes, é a tipologia dos defeitos, a sua quantidade e seus tamanhos, encontrados no material.

Quadro 3- Características intrínsecas da madeira

(continua)

Características		Classes de aparência				
		A	B	C+	C	D
Nó cabeça de alfinete*		Não admitidos	Admitidos 3/m ²	Admitidos		
Nó firme aderente			Admitidos até um diâmetro individual de: 15 mm, desde que o diâmetro acumulado não ultrapasse 30 mm/m ² . Podem possuir fendas, desde que muito pequenas	Admitidos até um diâmetro individual de: 50 mm. Podem possuir fendas, desde que pequenas	Admitidos até um diâmetro individual de: 60 mm.	Admitidos, mas ver (Nota)
Nó solto e nó soldado			Admitido até um diâmetro individual de: 6 mm, se emassado e até uma quantidade de 2/m ²	Admitido até um diâmetro individual de 5 mm, se não reparados e 25mm se emassados até uma quantidade de 6/m ²	Admitido até um diâmetro individual de: 40 mm	Admitidos, mas ver (Nota)
Fenda	Aberta		Admitido se inferior a: 1/10 do comprimento do painel, até uma largura individual de: 3 mm, e até uma quantidade de 3/m. Se corretamente emassadas	Admitido se inferior ao comprimento de 1/3, largura de 10 mm, e quantidade de 3/m. Fendas com mais de 2 mm de largura devem ser emassadas	Admitido se inferior ao comprimento de 1/2, largura de 15 mm, e até uma quantidade de 3/m.	Comprimento ilimitado do comprimento do painel, até uma largura individual de: 25 mm e uma quantidade ilimitada
	Fechada	Admitidas				
Anomalias causadas por insetos, xilófagos, marinhos e parasitas vegetais		Não admitidos	Não admitidas	Marcas de parasitas vegetais não admitidas. Buracos de insetos e xilófagos marinhos admitidos até: um diâmetro de 3 mm e até uma quantidade de 10/m ²	Marcas de parasitas vegetais não admitidas. Buracos de insetos e xilófagos marinhos admitidos até: uma largura de 15 mm, um comprimento de 60 mm e até uma quantidade de 3/m ²	Admitidos, mas ver (Nota)

Quadro 3- Características intrínsecas da madeira

(conclusão)

Características	Classes de aparência				
	A	B	C+	C	D
Bolsões de resina e casca inclusa		Não admitidas	Admitidas até uma largura de: 6 mm se corretamente emassadas	Admitidas até uma largura de: 40 mm	Admitidos, mas ver (Nota)
Veios de resina		Não admitidas	Admitidos, se forem pequenos		Admitidos
Irregularidade na estrutura da madeira	Praticamente ausente	Admitidas se forem muito pequenas	Admitidas se forem pequenas		Admitidas
Descoloração que não danifique a madeira		Admitidas, se de baixo contraste			Admitidas
Fungos que destroem a madeira	Não admitidos		Não admitidos		
Outras características	Praticamente ausente		A considerar na categoria a que mais se assemelham		
NOTA : As características da madeira são admitidas, desde que não prejudiquem a utilização do painel					
*Nós cabeça de alfinete: nós firmes e aderentes com não mais que 3 mm de diâmetro					

Fonte: ABNT NBR ISO 2126-3 (2006) adaptado pelo autor (2023)

Segundo Wei *et al.* (2019), a classificação das lâminas é uma das vantagens técnicas mais significativas na produção do LVL por possibilitar a formação de chapas com lâminas em classes de qualidade pré-definidas. O LVL adequa-se para aplicações como sistemas construtivos de vigas, caibros, painéis, forro, assoalho, pranchas de andaimes e cordas treliçadas, por possibilitar a destinação de lâminas com maior adequação para as devidas aplicações como sistemas construtivos.

Segundo Ribeiro *et al.* (2016), o uso de métodos não destrutivos permite determinar as características mecânicas das lâminas sem provocar qualquer tipo de modificação que inviabilize a utilização do material. Por outro lado, Bortoletto Júnior (2006) afirma que o método de classificar visualmente por aparência é ineficaz e não fornece alta confiabilidade para classificar as lâminas utilizadas na produção de chapas de LVL, pois o produto é usado principalmente como componente estrutural e precisa garantir propriedades mecânicas elevadas.

2.3.7 Tratamento preservante

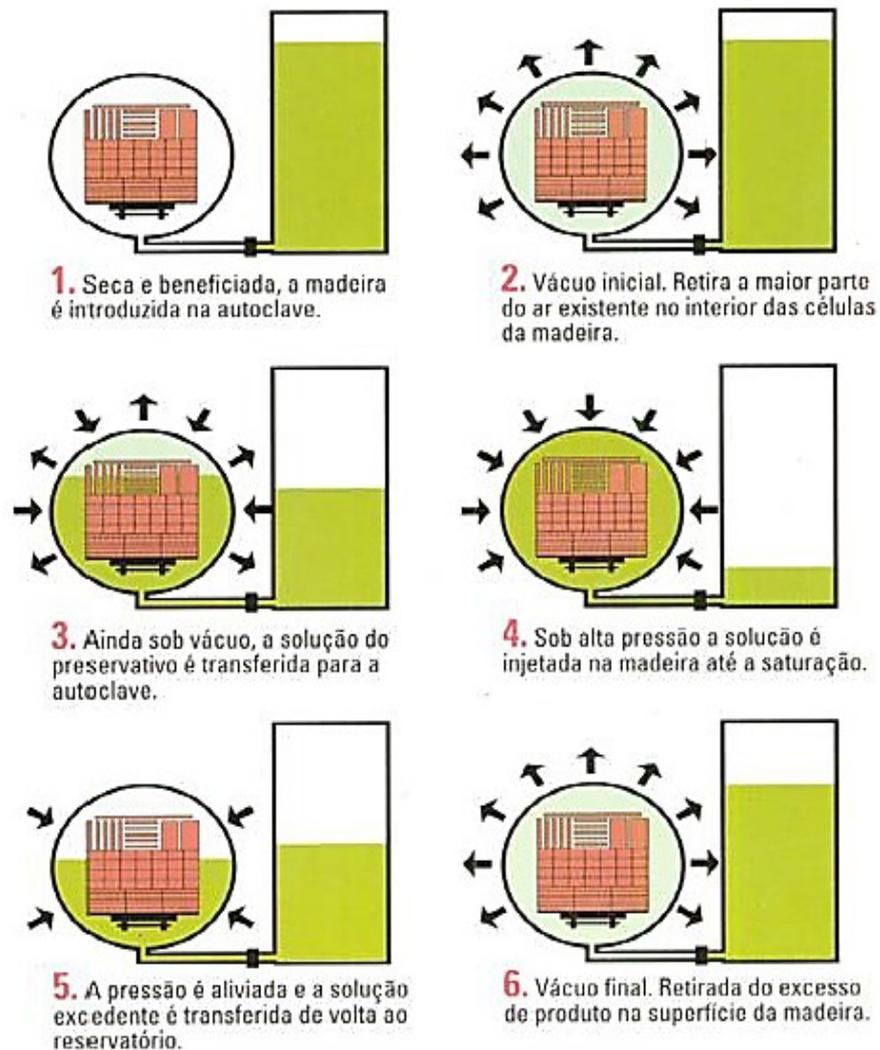
O tratamento preservante de lâminas de madeira consiste na impregnação de produtos químicos no material. No tratamento, ocorre a adição de substâncias repelentes ou tóxicas em proporções adequadas, cuja finalidade é conferir o aumento da resistência da madeira aos ataques de agentes biológicos para a proteção contra esses agressores (LEPAGE, SALIS e GUEDES, 2017; SOUZA e DEMENIGHI, 2017).

A Associação Brasileira de Preservantes de Madeira (2017) descreve dois processos para o tratamento da madeira: o não industrial, que é todo processo que não engloba o uso de bombas ou equipamentos industriais como o realizado por aplicadores manuais, e o outro, o industrial, que é realizado por meio do sistema de autoclave com bombas de vácuo e pressão. Os processos industriais podem ser classificados em célula cheia e vazia.

O método de célula cheia é o mais utilizado e consiste na aplicação de um vácuo inicial para retirada do ar presente no maquinário de autoclave. Em seguida, realiza-se o enchimento do equipamento com a solução preservativa e a pressão interna da autoclave é aumentada para que a solução preservante preencha completamente até as células da estrutura física da madeira. Em seguida, a solução preservante é drenada e aplica-se novo vácuo para a retirada do líquido em excesso do material tratado. Quanto ao método de célula vazia a única diferença é que não se aplica o vácuo inicial para a retirada do ar interior do maquinário (ARAÚJO, MAGALHÃES e OLIVEIRA, 2012; RAVASI e LILGE, 2013).

O tratamento realizado sob vácuo-pressão como o método de célula cheia, provoca a impregnação através da pressão superior à atmosfera. Isso controla o conservante absorvido e fornece uma proteção mais eficaz (Figura 5). A eficiente distribuição e a penetração uniforme do produto preservante tornam esse procedimento o mais eficiente para a proteção da madeira (MAGALHÃES, 2005; LEPAGE, SALIS e GUEDES, 2017).

Figura 5- Aplicação de preservação em autoclave (método célula cheia).



Fonte: Presermadde (2016)

A solução conservante de arseniato de cobre cromatado (CCA), que é o produto mais utilizado, deve a alta eficiência ao poder de fixação e à garantia de sua ação fungicida e inseticida. O CCA é um sal hidrossolúvel aplicado normalmente em autoclave onde o arsênio tem a função de agente inseticida, o cobre, fungicida, e o cromo como elemento fixador (MENDES *et al.*, 2013; SOUZA; DEMENIGHI, 2017).

O tratamento preservante com CCA reduz significativamente as deteriorações em região de apodrecimento e os problemas associados à exposição às intempéries. Isso permite que a madeira seja usada em ambientes internos e externos em contato com o solo e uma umidade (MACHADO *et al.*, 2006; AHN *et al.*, 2008; ARAÚJO, MAGALHÃES, e OLIVEIRA, 2012; VIVIAN *et al.*, 2020; SOLA, 2017; DIAS e BARREIROS, 2017).

2.3.8 Sobreposição das lâminas e montagem das chapas

A montagem das chapas consiste em aplicar o adesivo sobre as faces das lâminas e sobrepor uma sobre as outras. É necessário seguir uma sequência de montagem com numeração ímpar de lâminas, constituída, do sentido externo ao interno, por: lâminas de capa, de contracapa e de miolo (IWAKIRI, 2005). Segundo Mendoza *et al.* (2018), as chapas devem ser minimamente formadas por lâminas da mesma espessura, madeira de espécie e de propriedades similares e possuir o mesmo teor de umidade para assegurar um eficiente processo de colagem e de prensagem e garantir maior estabilidade dimensional e resistência mecânica do produto laminado.

Existem duas maneiras de distribuição das lâminas ao longo da espessura do da chapa. Na primeira, todas as lâminas sobrepostas pertencem a uma classe de resistência uniforme. Na segunda, também conhecida como multilaminada, lâminas de diferentes classes de resistência são combinadas. O método multilaminado em painéis pode ser utilizado para atender aos princípios de balanceamento do produto laminado, com o uso das diferentes propriedades mecânicas de lâminas que formam a chapa de LVL (SUCHSLAND, 1972; BODIG e JAYNE, 1982; MENDOZA *et al.*, 2018).

A composição de chapas de LVL do tipo multilaminada é admitida para uso de lâminas que apresentam menor resistência, dispostas nas camadas de menor solicitação e as com maior resistência, nas posições com alta solicitação. Essa configuração permite o aproveitamento de todo o material sem comprometer a confiabilidade do produto que será comercializado (MULLER, 2009).

2.3.9 Colagem das lâminas

O processo de colagem de lâminas de madeira requer a realização de uma limpeza na superfície do aderente para remover poeiras ou resíduos. Isso permite uma união adequada por meio do contato em nível molecular entre as lâminas (FRIHART, 2005). Sharapov *et al.* (2022) afirmam que, para garantir as propriedades de produtos de LVL a colagem das lâminas deve ser realizada por resinas fenólicas de baixo peso molecular, o que permite melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade do material.

De acordo com *Raute Engineered Wood* (1980), para a colagem, a definição da gramatura do adesivo deve estar na textura em acordo com o tipo de madeira e a qualidade da superfície da lâmina que receberá o adesivo. O adesivo, além de uni-las, também é responsável por reforçá-las por meio do preenchimento dos poros das lâminas. As gramaturas normalmente utilizadas na fabricação de elementos estruturais em LVL são de 140 g/m² a 230 g/m², em cada superfície de aplicação. Contudo, a aplicação do adesivo sobre a extensão das duas faces das lâminas a serem coladas deve possuir gramatura entre 420 e 480 g/m² (BERTOLETTO JÚNIOR, 2006). Na Tabela 4, são apresentados parâmetros para colagem de produtos utilizados em diferentes espécies de madeira de *Pinus*.

Tabela 4- Uso de fenol-formaldeído na produção de chapas de LVL com *Pinus spp.*

Espécie de troncos	Espessura das lâminas (mm)	Gramatura (g/m ²)	Linha de aplicação	Referência
<i>Pinus spp</i>	-	430		KRETSCHMANN <i>et al.</i> (1993)
<i>Pinus taeda</i>	28,8; 29,4; 3,2; 4,2	480	Dupla	MATOS (1997)
<i>Pinus taeda</i>	3,3	420		PEDROSA (2003)
<i>Pinus merkusii</i>	-	190	Simplex	BORTOLETTO JÚNIOR (2006)

Fonte: Muller (2009) adaptado pelo autor (2022)

Após a aplicação do adesivo e a sobreposição das lâminas, é necessário um período de "descanso" conhecido como "assemblagem" para garantir que o adesivo seja transferido corretamente entre as lâminas adjacentes e que ele seja absorvido por elas. Esse procedimento também é conhecido como prensagem a frio. Nesse processo, deve ser feita a inspeção para identificar o "sangramento" de cola, caracterizado pelo derramamento do excesso de adesivo, o qual evidencia o espalhamento do líquido por toda superfície das lâminas (IWAKIRI, 2005).

De acordo com Nogueira (2017) e Segundinho *et al.* (2017), as lâminas de madeira devem ser secas e apresentar umidade entre 6 e 12% em condições controladas de temperatura abaixo de 40 °C como forma de assegurar a qualidade e não comprometer a fixação do adesivo nas lâminas. Qualquer tipo de madeira pode ser colada se os adesivos usados forem compatíveis e fornecerem uma adesão de alta eficiência entre os laminados (DAVIS, 1997; THOEMEN *et al.*, 2010).

2.3.10 Prensagem

O processo de prensagem das lâminas de madeira para a fabricação das chapas de LVL podem ocorrer de duas formas: a frio em uma prensa mecanizada, e a quente com pratos aquecidos. Muller (2009) explica como o processo de prensagem a frio das lâminas permite que o adesivo se mova, transfira e penetre facilmente pelos poros da lâmina de madeira (Figura 6). Além disso, o processo fornece um tempo significativo para que a água em excesso possa sair da linha de cola. Para cada painel prensado com chapas de LVL com espessuras de 15, 25, 38 e 45 mm, recomenda-se um período de prensagem de 60 min. Muller (2009) afirma que um período de prensagem da chapa a frio menor que 40 min é um tempo falho e pode ser um fator de formação de bolsas de vapor entre as linhas de cola.

Figura 6- Prensagem de junção das lâminas



Fonte: LVL Handbook Europe (2019)

Para uma colagem satisfatória e considerada eficaz, o adesivo deve ser curado já durante o processo de prensagem a quente, por meio da exposição do material à altas temperaturas. O processo de prensagem a quente determina as características físicas e mecânicas do produto LVL acabado. Ele é conhecido como a consolidação das camadas de lâminas de madeira resinada (GINZEL e PERAZA, 1966; HASELEIN e PAULESKI, 2004; FRIHART, 2005; BIAZZON *et al.*, 2019; MOHAMMAD *et al.*, 2022).

Na prensagem a quente, o calor é transferido da placa aquecida para as superfícies do material laminado. Como resultado, a umidade da superfície das camadas de madeira é vaporizada e transfere-se das superfícies para o núcleo do

painel. Isso ocorre em razão da diferença de pressão do vapor entre esses níveis. As resinas fenólicas necessitam de uma exposição superior a 100 °C para que ocorra a cura adequada do adesivo (SANTOS, 2016; MOHAMMAD *et al.*, 2022).

Segundo Raute Engineered Wood (1980) e Baldwin (1995), no ciclo de prensagem a quente, vários fatores, incluindo tempo, pressão e temperatura, podem afetar diretamente a espessura final do painel. Isso ocorre, em função da espécie de madeira utilizada, da umidade das lâminas e da quantidade de cola aplicada no produto submetido a altas temperaturas. Em consequência, isso influenciará na qualidade dimensional da chapa de LVL.

De acordo com Raute Engineered Wood (1980), Tammela (1998) e Müller (2009), os produtos à base de madeira de *Pinus* colado com adesivo fenólico devem ser prensados por pelo menos 25 min submetido à pressão de 0,90 a 1,37 MPa e à temperatura entre 135 a 140°C para garantir a qualidade das lâminas.

2.3.11 Acabamento das chapas

Após a prensagem, as chapas são esquadrejadas por corte e lixadas no processo de acabamento. O esquadrejamento é feito por meio do corte para adequar as dimensões padronizadas das chapas. O processo de esquadrejamento consiste na redução das laterais da chapa para ajustar as medidas às dimensões comerciais por meio do controle de suas faces. O objetivo do esquadrejamento é tornar a chapa um produto completo com bordas uniformes ao longo da largura e do comprimento solicitados pelo cliente ou padronizados pelo fabricante (CARVALHO *et al.*, 2004).

Segundo o LVL *Handbook Europe* (2019), depois do esquadrejamento por corte e do lixamento da chapa, é realizada a inspeção da qualidade do produto acabado, a fim de identificar prováveis necessidades da realização de últimos preparos de pequena proporção. Esses reparos são caracterizados por soluções práticas e possíveis de serem feitas manualmente, como, por exemplo, o lixamento por meio de lixa com granulação menor em relação à aplicada pela lixadeira industrial, a aplicação de verniz ou de pintura.

As condições de acabamento das superfícies são extremamente relevantes para garantir a qualidade e os resultados satisfatórios das faces de peças em madeira. Segundo Biazzon *et al.* (2019), a superfície deve ser lisa, aplainada, livre de marcas

de usinagem incluindo “batidas” de plaina, partes esmagadas, além da presença de farpas e fibras soltas.

2.3.12 União de chapas

Quando necessário unir duas chapas, utiliza-se o modelo de uniões dentadas para a formação de produtos com comprimentos maiores. A norma DIN 68 140, apresenta as geometrias de usinagem dos dentes e o grau de enfraquecimento para o enquadramento da chapa unida dentro das classificações de uso estrutural ou não-estrutural. O comprimento dos entalhes para uso estrutural deve estar entre 7,5 e 60 mm e para uso não-estrutural entre 4 e 30 mm (l). A espessura da extremidade de um dente deve situa-se entre 0,2 a 2,7 mm e 0,4 a 2 mm (b) e o passo dos dentes deve ser de 2,5 a 15 mm e 1,6 a 10 mm (t), respectivamente (Tabela 5). O grau de enfraquecimento deve estar entre 8 a 18 % para chapas de uso estrutural e entre 25 a 20 % para uso não-estrutural.

Tabela 5- Parâmetros das dimensões dos entalhes e grau de enfraquecimento

Parâmetros		l = comprimento dos entalhes (mm)	b = espessura da extremidade de um dente. (mm)	t = passo dos dentes. (mm)	v = (b/t) grau de enfraquecimento (%)
Recomendados pela literatura (DIN 68 140)	Estrutural	7,5	0,2	2,5	8
		10	0,6	3,7	16
		20	1	6,2	16
		50	2	12	17
		60	2,7	15	18
	Não Estrutural	4	0,4	1,6	25
		15	1,7	7	24
		30	2	10	20

Fonte: DIN 68 140 (1996) adaptado pelo autor (2023)

2.4 METODOLOGIA DE MAPEAMENTO DE PROCESSO PRODUTIVO

Shingo (1996) e Bonfatti Júnior, Lengowski e Ludka Júnior (2018) relatam que o mapeamento do processo de produção é uma metodologia de coleta de dados que descreve a realidade de fabricação de um determinado produto. O método de mapear compreende a análise *in loco* e o acompanhamento da fabricação de qualquer produto que entre em contato físico com um processo produtivo e levantar dados do procedimento aplicado na materialização de um produto.

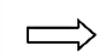
Em uma visão generalista, o mapeamento de processos produtivos compreende uma metodologia cujo o objetivo é levantar o processo do início, ainda como matéria-prima, até o final, como produto acabado. Para o mapeamento da produção de um produto, existem ferramentas gráficas de coleta, de organização e de registro de dados que possibilitam a realização da análise das informações levantadas em operações ou em processos. As ferramentas gráficas propiciam uma leitura simples e intuitiva da fabricação de um determinado produto, apresentando fácil compreensão e ainda permitem detectar problemas e ineficiências dentro do processo ou da operação mapeada (SHINGO, 1996; BORBA, 2021).

2.4.1 Fluxograma de processos

Os fluxogramas de processos são a melhor forma de representar, por meio de simbologias gráficas, uma sequência de etapas aplicadas em um determinado procedimento, a fim de facilitar sua análise (FERNANDES e ALMEIDA, 2010). Segundo Harrington (1993), a elaboração de um bom fluxograma pode valer até mais do que mil procedimentos. Para Mello (2008), as principais vantagens de utilização da técnica de fluxograma é permitir a verificação das conexões e como os componentes analisados se relacionam, seja ele mecanizado ou não, a fim de possibilitar uma fácil análise de sua eficácia. Essa ferramenta gráfica possibilita localizar deficiências, por melhor evidenciar todo procedimento necessário em transportes, operações e formulários, além de entender qualquer alteração proposta nos sistemas existentes em razão da clara visibilidade das modificações inseridas.

A *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) definiu cinco símbolos que são apresentados pela norma *American National Standards Institute* (ANSI) para a representação de fluxograma de processo produtivo (Figura 7) (PEINADO e GRAEML, 2007; RIBEIRO, FERNANDES e ALMEIDA, 2010).

Figura 7- Simbologia para fluxograma de processos produtivos da ANSI

	Limites: utilizado para indicar o início e o fim do processo. Normalmente as palavras <i>Partida</i> ou <i>Início</i> e <i>Pare</i> ou <i>Fim</i> são inscritas no símbolo.
	Atividade (operação): serve para indicar que houve uma mudança no item pela execução do trabalho, atividade de uma máquina ou pela combinação de ambos. Normalmente, inscreve-se no retângulo uma curta descrição da atividade realizada.
	Ponto de decisão: utilizado quando uma decisão deve ser tomada. Tipicamente, as saídas do losango são assinaladas com as opções. (por exemplo, Sim – Não, Verdadeiro – Falso).
	Inspeção: utilizado para indicar que o fluxo do processo é interrompido para que a qualidade da saída possa ser avaliada. Normalmente envolve uma operação de inspeção realizada por alguém que não seja a pessoa que executou a atividade anterior. Pode também indicar o ponto em que uma assinatura de aprovação se torna necessária.
	Sentido de fluxo: serve para indicar o sentido e a sequência das fases do processo. Uma seta é utilizada para movimentar de um símbolo a outro.

Fonte: Harrington (1993) adaptado pelo autor (2022)

2.4.2 Mapofluxograma

O Mapofluxograma é uma ferramenta gráfica utilizada para o estudo de movimentações físicas que ocorrem dentro de um processo produtivo. Ela levanta as lacunas existentes e o posicionamento dos postos de trabalhos organizados em *layouts* de fabricação que seguem uma determinada sequência (BARNES, 1977 e BATISTA *et al.*, 2006).

Essa ferramenta gráfica é produzida a partir da planta nas quais são executadas as etapas de produção de uma indústria. Inicialmente, é necessário definir uma planta que ilustre toda composição existente dos locais de trabalhos e indicar o fluxo do processo ao percorrer os postos de trabalho que executam as atividades de produção. Essa ferramenta ilustrativa é elaborada por simbologias que possibilitam o claro entendimento dos momentos existentes em uma produção (SOUTO, 2004; BARNES, 1977 citado por COSTA, 2020; GONÇALVES e ALMEIDA JUNIOR, 2012).

O Mapofluxograma possibilita adquirir uma visão geral do ambiente de fabricação e identificar possíveis melhorias de deslocamento, fluxo da composição física de produção e atividades desnecessárias ou dispensáveis como forma de otimizar o tempo de produção. Seu foco é trabalhar no entendimento do processo e até no melhoramento de mudanças na direção e de cruzamento do fluxo, retornos, movimentos longos entre atividades e pontos de congestionamentos do tráfego (SOUTO, 2004 e BARNES, 1977 citado por COSTA, 2020).

2.5 MÉTODOS DE ENSAIO E NORMAS PARA A CARACTERIZAÇÃO FÍSICO - MECÂNICA DA MADEIRA

Segundo Logsdon, Finger e Borges (2007), as principais características físico-mecânicas para avaliar a madeira utilizada na produção de produtos de LVL, são: para caracterização física, a umidade, a densidade e a estabilidade dimensional; para caracterização mecânica, as resistências à compressão paralela e perpendicular às fibras, o fendilhamento e a dureza. A determinação dessas propriedades é realizada segundo métodos de ensaios que garantem a repetibilidade e a comparação entre os resultados parametrizados por meio dos procedimentos descritos em normativas nacionais e internacionais.

Entre as normas utilizadas para caracterização da madeira encontram-se a brasileira ABNT NBR 7190 (1997) - Projeto de estruturas de madeira, a europeia BS EN 384 (2004) - *Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density*, e as americanas ASTM D4442 (2020) - *Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood- Based Materials¹*, ASTM D2395 (2014) - *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials¹*, e a ASTM D143 (2021) - *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. No Apêndice B, apresenta-se os parâmetros dimensionais e quantitativos dos Corpos de Prova (CPs) para os ensaios.

2.6 MÉTODOS DE ENSAIO E NORMAS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DO LVL

Segundo Nogueira (2017), as principais propriedades consideradas para a caracterização físico-mecânicas do LVL são: resistência ao cisalhamento, resistências à compressão paralela e perpendicular às fibras, resistência à tração paralela às fibras, os módulos de elasticidade (MOE) e de ruptura na flexão (MOR) e a resistência à delaminação do produto.

A determinação destas propriedades pode ser feita segundo normas nacionais e internacionais. Por se tratar de um material de origem norte americana, as normas brasileiras não contemplam todos os ensaios para essa caracterização do LVL. A metodologia que trata de um material parecido, são as normas ABNT NBR

17002 (2021) e NBR ISO 12466-1. A primeira trata de compensados de madeira e requisitos de ensaios para chapas estrutural e não estrutural. A segunda norma abrange o produto laminado e apresenta parâmetros para caracterização de madeira compensada e os métodos de ensaio para avaliação da qualidade de colagem (NOGUEIRA, 2017). Adaptações ainda podem ser realizadas utilizando os parâmetros apresentados pela ABNT NBR 7190 (1997) e a ABNT NBR 7190-6 (2022) - Projeto de estruturas de madeira - Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural.

As normas norte americanas para a realização dos ensaios de caracterização são: ASTM D5456 (2021) – *Standard Specification for Evaluation of Structural Composite Lumber Products*¹, D4688M (2014) - *Standard Test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber*¹ e a D2559 (2016) - *Standard Specification for Adhesives for Bonded Structural Wood Products for Use Under Exterior Exposure Conditions*¹ (NOGUEIRA, 2017).

3 MÉTODO DA PESQUISA

Neste capítulo, a metodologia adotada para a realização dessa pesquisa é apresentada. Ela está organizada em 2 partes. A primeira trata, do mapeamento e da avaliação do processo de produção das chapas de *Laminated Veneer Lumber*, cujo objetivo é levantar as etapas que compõem a fabricação do produto laminado e seus respectivos parâmetros técnicos produtivos. A segunda refere-se à caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira e da chapa de LVL, para identificar os desempenhos apresentados pelos materiais, para entender os níveis de qualidade e possibilitar a realização de comparativos de forma qualitativa.

3.1 MAPEAMENTO DO PROCESSO PRODUTIVO DO LVL

O mapeamento do processo de produção do LVL foi realizado na fábrica de chapas de LVL instalada no município de Lages, com localização no Planalto Catarinense, região sul do Brasil. Foram realizadas observações *in loco* de forma ininterrupta ao longo de 7 meses, no período de outubro de 2021 e abril de 2022, por meio de inspeções visuais, mediante observações críticas de cada etapa que compõe o processo de fabricação das chapas de LVL e da aplicação das metodologias de mapeamento do processo produtivo, fluxograma e mapofluxograma. O mapeamento consistiu em 3 principais momentos: a observação *in loco*, a aplicação de um formulário de levantamento dos parâmetros utilizados na produção e a organização das informações com o auxílio de esquemas gráficos para leitura do processo produtivo adotado pela empresa.

3.1.1 Determinação da infraestrutura e *layout* da fábrica

Para determinar a infraestrutura, o *layout* da fábrica e o processo de transformação de troncos de *Pinus taeda* em chapas de LVL, foram usados métodos visuais, por meio de observação crítica e de acompanhamento *in loco* e captura de fotos. Isso permitiu o reconhecimento e o entendimento da infraestrutura e do *layout* da indústria de laminados.

3.1.2 Determinação do fluxo de produção das chapas de LVL

Foi usado o método visual por meio de observação do processo de fabricação como forma de identificar o fluxo de produção das chapas de LVL, analisando cada etapa do processo produtivo, desde o recebimento das toras de madeira até o acabamento das chapas. Foi elaborado um mapafluxograma para registro das informações para a promoção da estrutura organizacional do fluxo de produção das chapas laminadas. Os quais estão apresentados no item 4.1.2.

3.1.3 Levantamento em campo das etapas e dos parâmetros de produção das chapas de LVL

O levantamento das etapas de produção das chapas de LVL foi realizado por meio de observação *in loco*, de anotações e de registros fotográficos. O método de fluxograma foi usado para documentar as etapas que compõem o processo produtivo. Este método organiza, de forma sequencial, os procedimentos de fabricação do produto e permite identificar os pontos fortes e fracos presentes no processo produtivo.

No levantamento dos parâmetros adotados pela empresa na produção das chapas de LVL, foi aplicado o formulário apresentado no Apêndice A, o qual possibilitou a coleta das informações quantitativas e qualitativas do processo produtivo. As informações foram coletadas nos setores de produção e de qualidade da empresa.

3.1.4 Avaliação do mapeamento

O método 5W1H foi utilizado para avaliar os dados do mapeamento do processo produtivo. Essa metodologia foi utilizada por melhor enquadrar a finalidade deste estudo e possibilitar a avaliação, a organização e a sistematização das etapas de fabricação. A avaliação dos resultados foi feita pela comparação entre os dados levantados pelo mapeamento realizado *in loco* na fábrica, e as informações sobre a fabricação de materiais laminados apresentadas na literatura.

3.1.5 Diagnóstico do processo produtivo das chapas de LVL

Para a elaboração do diagnóstico foram comparadas as recomendações apresentadas na literatura científica, com os dados identificados por meio do mapeamento *in loco*. Após a avaliação dos resultados, foram pontuados, avaliados e diagnosticados os potenciais fatores de interferência na qualidade da chapa de LVL, propondo medidas corretivas para minimizar ou eliminar as problemáticas identificadas.

3.2 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA E DA CHAPA DE LVL

Nesta subseção, serão apresentados as metodologias de ensaio e os corpos de prova que serão usados para determinação das propriedades físico-mecânicas da madeira e do LVL.

A usinagem dos corpos de prova e os ensaios foram realizados nos Laboratórios de Construção e Materiais (LABCOM - UDESC), no de Pesquisa em Painéis de Madeira (LAPPESC - UDESC) campus de Lages, e no de Processos de Industrialização da Madeira (LAPIM - FURB) campus 2 de Blumenau. Neste estudo, dois materiais foram analisados: a madeira maciça usada como matéria-prima para a produção do LVL e as chapas de LVL produzidas pela empresa.

3.2.1 Avaliação das propriedades físico-mecânica da madeira

A avaliação das propriedades físico-mecânica da madeira utilizada na fabricação do LVL foi baseada nas seguintes propriedades: teor de umidade, densidade básica, estabilidade dimensional, resistências à compressão paralela e perpendicular às fibras, ao fendilhamento paralelo às fibras e dureza. Eles foram realizados no Laboratório de Pesquisa em Painéis de Madeira (LAPPESC), do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), campus de Lages.

Os critérios definidos pela norma ABNT NBR 7190 (1997) - Projeto de estruturas de madeira foram os utilizados na realização dos ensaios. As dimensões

dos corpos de prova e o tamanho das amostras são apresentados de forma compilada no Apêndice B.

3.2.2 Avaliação físico-mecânica da chapa de LVL

As propriedades físico-mecânicas do produto de LVL avaliadas foram as seguintes: (1) módulos de elasticidade e de ruptura à flexão estática à três pontos (MOE e MOR, respectivamente), com as lâminas posicionadas verticalmente; (2) resistência ao cisalhamento das linhas de cola localizadas na parte central, superior e inferior da espessura da chapa; (3) resistência à tração nas emendas dentadas; (4) resistência à compressão paralela às fibras e (5) ensaio de delaminação por meio do teste em autoclave com a aplicação de vácuo, pressão e secagem das amostras. Os ensaios foram conduzidos em dois laboratórios distintos. O primeiro, trata-se do Laboratório de Pesquisa em Painéis de Madeira (LAPPESC), está localizado no campus de Lages pertencente a Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). O segundo, é o Laboratório de Processos de Industrialização da Madeira (LAPIM), encontra-se nas instalações da Universidade Regional de Blumenau (FURB), no campus 2 de Blumenau.

Os ensaios para a determinação das propriedades do LVL foram adaptados das normas ABNT NBR 17002 (2021), que trata de requisitos e métodos de ensaio para compensado, ABNT NBR ISO 12466-1 (2012), de madeira compensada- Qualidade da colagem, e ABNT NBR 7190-6 (2022), que trata de projeto de estruturas de madeira- Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural.

3.2.3 Material testado

As madeiras maciças testadas foram fornecidas pela empresa produtora de chapas de LVL. Elas eram oriundas de ripas secas ao ar, retiradas de toras de *Pinus taeda* com idade mínima de 12 anos, de aproximadamente 2,60 m de comprimento e diâmetros que variavam entre 30 e 80 cm. As toras eram provenientes de florestas plantadas, cultivadas no Planalto Catarinense, região Sul do Brasil.

As chapas de LVL, eram compostas por lâminas de 3,0 mm de espessura, sem tratamento preservante, coladas com adesivo fenol-formaldeído com a aplicação de 410 g/m³. Elas apresentavam dimensões totais de 1220 mm de largura, 2440 mm de comprimento e 40 mm de espessura. As uniões dentadas de modelo *finger joint* testadas caracterizavam-se por apresentar as dimensões de 50 mm × 450 mm × 17 mm, com 210 mm da zona de ruptura e dentes centralizado no corpo de prova (ABNT NBR 7190, 1997).

3.2.4 Amostras e corpos de prova

O tamanho das amostras e dos corpos de prova bem como a metodologia de ensaios foram determinados conforme as normas ABNT NBR 7190 (1997), 7190-6 (2022), 17002 (2021) e ISO 12466-1 (2012), (Quadro 4). A quantidade de corpos de prova para cada ensaio foi estabelecida com base no mínimo exigido pelas respectivas normas, acrescido de uma quantidade suplementar para cobrir possíveis erros que pudessem ocorrer durante os testes.

Os corpos de prova foram usinados no Laboratório e Materiais (LABCOM) do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade do Estado de Santa Catarina –UDESC, campus de Lages. Eles foram cortados com serra circular a partir de ripas obtidas de um dos lotes do material fornecido pela empresa fabricante das chapas laminadas.

Quadro 4- Quadro de ensaios para caracterização da madeira maciça e das chapas de LVL

Material	Ensaio	Dimensões (Larg.- Compr.- Espess.)	Nº de CPs por teste	Nº de CPs testados	Norma (ABNT NBR)
Madeira maciça	Umidade	20 mm × 50 mm × 30 mm	12 CPs para cada teste Total: 36	41	7190 (1997)
	Densidade				
	Estabilidade dimensional				
	Compressão paralela às fibras	50 mm × 150 mm × 50 mm	12	13	
	Compressão perpendicular às fibras	50 mm × 50 mm × 100 mm	12	13	
	Dureza Janka	50 mm × 150 mm × 50 mm	12	15	
	Fendilhamento	50 mm × 95 mm × 50 mm	12	15	
Chapas de LVL	Flexão estática	50 mm × 800 mm × 40 mm	6	9	17002 (2021)
	Compressão paralela	50 mm × 150 mm × 40 mm	12	15	7190 (2022)
	Tração nas emendas dentadas	50 mm × 450 mm × 20 mm	12	15	
	Cisalhamento na linha de cola	20 mm × 100 mm × 40 mm	30	46	12466-1 (2012)
	Delaminação	85 mm × 120 mm × 40 mm	12	14	7190-6 (2022)

CP: Corpo de prova

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

3.2.5 Acondicionamento dos corpos de prova

Todos os corpos de prova foram acondicionados em uma câmara de climatização a $25\text{ °C} \pm 1$ e $65\% \pm 1$ de umidade relativa do ar para a estabilização do seu teor de umidade (Figura 9). Para os ensaios para a determinação da densidade, da umidade e da estabilidade dimensional, eles permaneceram na câmara de climatização por 30 dias corridos. Os corpos de prova para a determinação das resistências à compressão paralela e perpendicular às fibras, da dureza e do fendilhamento permaneceram acondicionados entre 13 a 124 dias, respectivamente, com a realização de pesagens regulares, a fim de se verificar a estabilização da massa de cada corpo de prova.

Os corpos de prova para a determinação dos módulos de elasticidade e de ruptura à flexão, da resistência à tração das emendas dentadas, da resistência ao cisalhamento e da delaminação ficaram acondicionados na câmara de climatização entre 13 a 136 dias, submetidos a $25\text{ °C} \pm 1$ e $65\% \pm 1$ de umidade relativa do ar (Figura 8), atendendo às especificações das normas ABNT NBR 17002 (2021) e da ISO 12466-1 (2012).

Figura 8- Corpos de prova na câmara de estabilização do teor de umidade



Fonte: acervo do autor (2022)

3.2.6 Ensaio para a determinação das propriedades físico-mecânicas

Para a determinação das propriedades físicas foram utilizados paquímetro, balança com precisão de 0,01 g, dessecador de vidro e estufa de secagem. Contudo, para determinar as propriedades mecânicas foi usada a máquina de teste universal EMIC DL-30000 com os acessórios compatíveis para cada ensaio. Esta máquina tem capacidade de carga máxima de 300 kN, um curso de travessa máximo de 1.200 mm sem garras e opera em uma faixa de velocidade de 0,01 a 500 mm/min (Figura 9). A velocidade do curso da travessa usada para cada ensaio, foi determinada de acordo com a especificação das respectivas normas.

Figura 9- Máquina de teste universal EMIC DL-30000



Fonte: acervo do autor (2022)

O ensaio de delaminação foi realizado conforme a ABNT NBR 7190-6 (2022), com uma autoclave, bomba para aplicação de vácuo e pressão, e secadora com regulagem de temperatura, umidade e velocidade do ar. Parâmetros estabelecidos pela respectiva norma utilizada para a caracterização de produtos de madeira lamelada colada com adesivo fenólico.

3.3 TRATAMENTO DOS DADOS DO MAPEAMENTO DO PROCESSO PRODUTIVO DA CHAPA DE LVL

Os dados coletados durante a fase de mapeamento do processo produtivo foram organizados e analisados usando ferramentas gráficas como fluxogramas, mapofluxogramas, além de registros fotográficos. Isso permite ler e extrair observações importantes sobre o processo de fabricação adotado pela empresa catarinense produtora das chapas de LVL. A avaliação dos dados coletados foi feita à luz da literatura técnica, a fim de se estabelecer um diagnóstico do processo produtivo, auxiliando a compreensão da gestão e do funcionamento das etapas de produção das chapas do LVL.

3.4 TRATAMENTO DOS DADOS DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA MACIÇA E DA CHAPA DE LVL

Os resultados quantitativos dos testes realizados na madeira e no LVL foram sistematicamente registrados com base nos dados fornecidos pela máquina universal de ensaio, que avaliou as propriedades do material. A determinação desses resultados seguiu as equações estabelecidas pelas normas ABNT NBR 7190 (2022), ABNT NBR 17002 (2021) e ABNT NBR 12466-1 (2012), as quais são apresentadas no Apêndice F para cada teste mencionado no Quadro 9.

A avaliação desses resultados levou em consideração as médias, os desvios padrões e os coeficientes de variação. Além disso, foi aplicado o teste T de Student, uma técnica de estatística inferencial, para determinar se existem diferenças significativas entre as médias encontradas e para verificar o grau de confiabilidade dos resultados, com um nível de confiança de 95%. As propriedades físico-mecânicas obtidas foram ajustadas, quando necessário, para um teor de umidade padrão de referência de 12%, de acordo com as normas ABNT NBR 7190:1997 e ABNT NBR 7190-6:2022.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados o mapeamento do processo produtivo do LVL, as etapas que compõem a fabricação da chapa de laminados, a avaliação dos processos de produção e das propriedades físico-mecânicas da madeira maciça e das chapas de LVL. Em seguida, são elaborados diagnósticos com base nos problemas levantados.

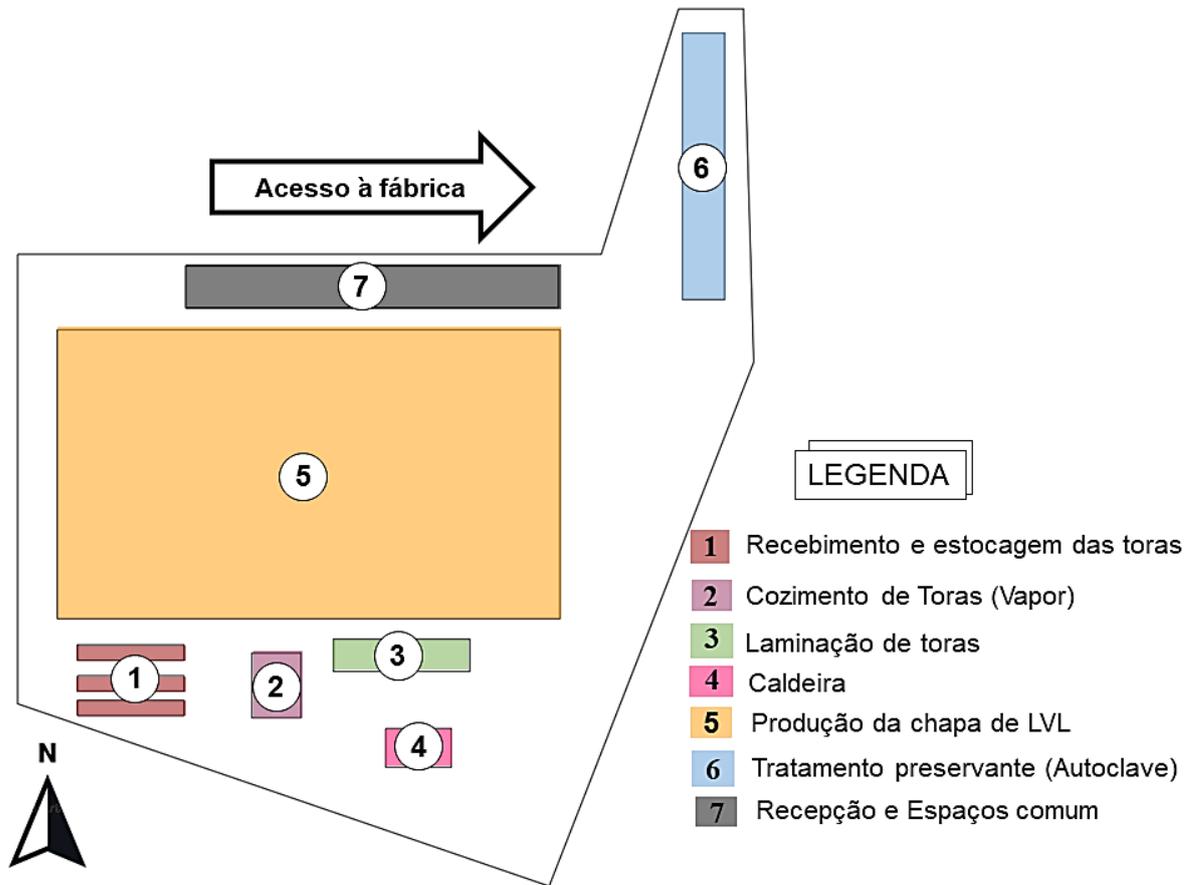
4.1 MAPEAMENTO DO PROCESSO PRODUTIVO DA CHAPA DE LVL

O mapeamento do processo de produção das chapas de LVL envolve a identificação da infraestrutura e o *layout* do processo produtivo, a análise do fluxo de fabricação adotado pela empresa e a investigação das etapas produtivas, bem como dos parâmetros de garantia de qualidade utilizados na produção do LVL. Os detalhes desses aspectos são apresentados a seguir.

4.1.1 Infraestrutura e *layout* da fábrica

A empresa produtora das chapas de LVL está implantada em um terreno de 17000 m². A instalação fabril é composta por 7 blocos, em ordem de fluxo produtivo, o espaço nº 1 corresponde ao local de recebimento e de armazenamento das toras de madeira utilizadas na produção, o nº 2, corresponde ao ambiente destinado à realização do cozimento dessa matéria-prima, no nº 3, está instalada a laminadora de toras e no nº 4 a caldeira onde é rejeitada a biomassa para a produção de calor e transformação em energia para uso do próprio maquinário da fábrica. O edifício nº 5 é o galpão principal, o maior dentre eles. Ele-abriga os setores administrativo e o de produção das chapas laminadas. No edifício nº 6 encontra-se a autoclave na qual é realizada a preservação química da madeira. O edifício de nº 7 abriga os espaços de recepção, o refeitório e as áreas comuns para uso dos funcionários (Figura 10).

Figura 10- Layout da fábrica de chapas de LVL



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.1.2 Fluxo da produção das chapas de LVL

Através da análise *in loco*, constata-se que o processo produtivo adotado pela empresa, em parte, segue as etapas/fases descritas na literatura (MULLER, 2009; LVL HANDBOOK EUROPE, 2019) (Figura 11), que são: (1) recebimento, (2) estocagem, (3) cozimento de toras, (4) laminação de toras, (5) guilhotinagem (6) secagem de lâminas, (7) classificação de lâminas, (8) tratamento preservante, (9) aplicação do adesivo, (10) prensagem à frio, (11) prensagem à quente, (12) esquadrejamento, (13) lixamento, (14) união de chapas, (15) inspeção da qualidade e (16) embalagem.

Figura 11- Processo de fabricação das chapas de LVL analisado *in loco*

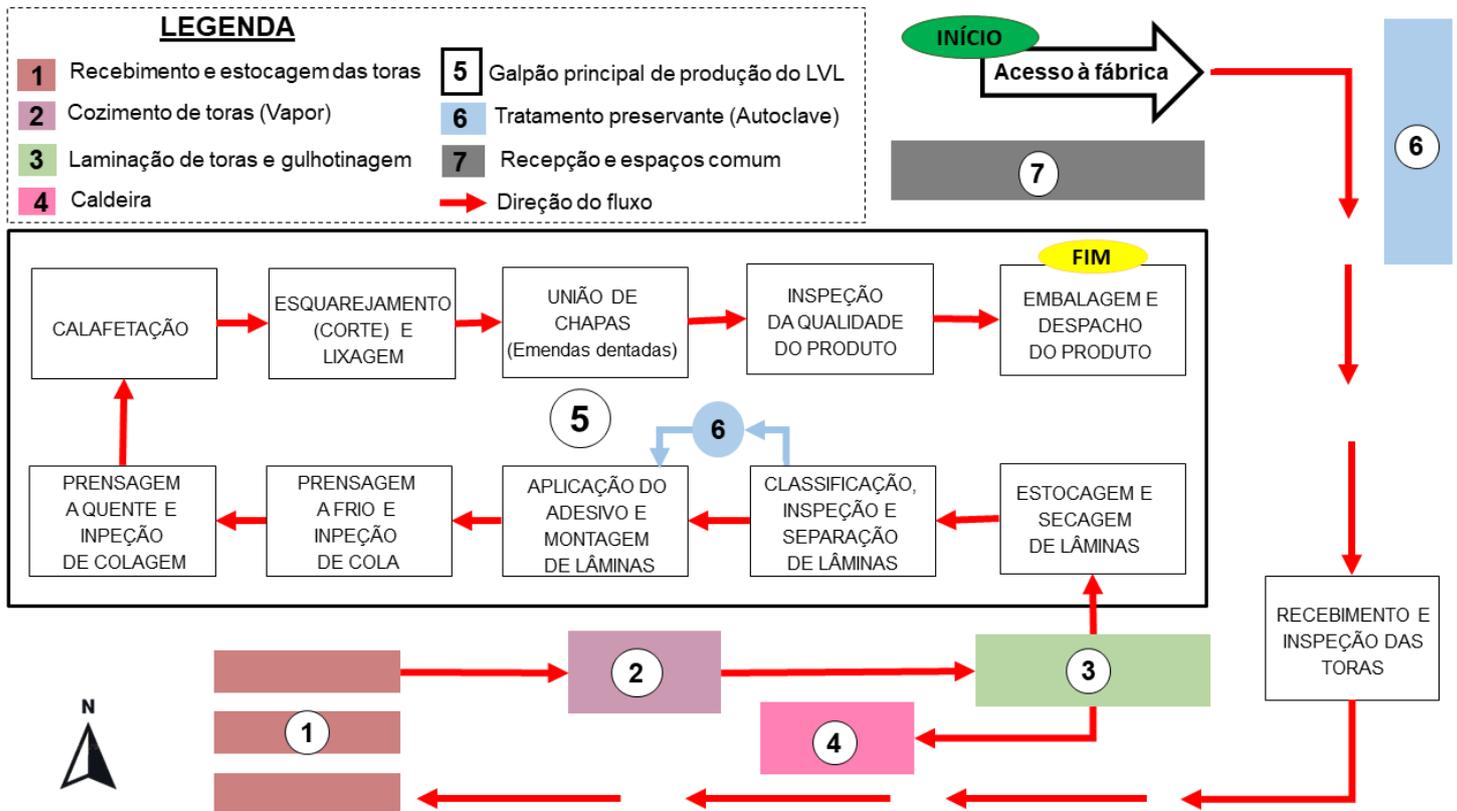


Fonte: acervo do autor (2021)

A logística usada pela empresa na fabricação das chapas de LVL é demonstrada por meio da ferramenta gráfica de mapofluxograma (Figura 12). O processo de produção das chapas de LVL, inicia com o recebimento das toras, no bloco nº 1, enviadas pelos fornecedores para as instalações da fábrica. Em seguida, nos blocos externos de nº 2, 3, 4, são desenvolvidas as atividades de cozimento e de laminação das toras, Além do uso dos resíduos para a produção de calor pela caldeira. Posteriormente, segue para o edifício nº 5, onde são executadas as etapas produtivas de secagem e de classificação das lâminas, de aplicação do adesivo, de prensagens das lâminas e acabamento por corte e lixamento.

Dentro do processo ocorre uma interrupção da sua sequência produtiva para a aplicação do preservante no bloco de nº 6. Após esse tratamento, o material retorna ao processo de fabricação para a etapa de aplicação do adesivo. O Bloco nº 7 não exerce influência no processo produtivo das chapas.

Figura 12- Mapofluxograma do processo de produção das chapas de LVL



Por meio das observações realizadas em campo, é possível identificar que a etapa de aplicação do produto preservante é um fator de interrupção do fluxo natural produtivo, e pode causar problemas na qualidade do processo e do produto laminado. O maquinário de aplicação do produto preservante está instalado fora do local no qual ocorrem as demais etapas de produção. Esse fato exige o transporte por uma empilhadeira das lâminas a serem tratadas e, conseqüentemente, a exposição delas às condições climáticas externas durante o deslocamento, tanto na ida para o tratamento quanto no retorno para a linha de produção. A proteção e o acondicionamento dessas lâminas durante o deslocamento pode ser uma medida fundamental para minimizar o problema de exposição às condições climáticas externas.

No ambiente de produção das chapas de LVL, foi possível identificar a inexistência de um local adequado com proteção contra poeiras e variações de temperatura para a estocagem das chapas que foram rejeitadas por não atenderem aos critérios mínimos para uso processo produtivo das chapas de LVL. De acordo com Iwakiri (2005) e Muller (2009), a falta de acondicionamento e armazenamento sob condições controladas das propriedades de umidade e temperatura do produto afeta a qualidade das lâminas na colagem, secagem e até uniformidade dimensional das chapas. A interrupção do processo de produção pode resultar na perda de qualidade do produto devido à exposição do material à poeira, resíduos e variações de temperatura no local de armazenamento. O procedimento recomendável é manter as chapas em um ambiente que permita o controle de temperatura e de umidade e realize a proteção contra sujeiras e outros agentes externos.

Foi possível identificar algumas etapas no processo produtivo que não são apresentadas na literatura. São elas: a) guilhotinagem das lâminas, b) separação das lâminas por classes definidas, c) aplicação do adesivo, d) união de chapas através de uniões dentadas de modelo *finger joint*, realizada nas chapas destinadas a fabricação de materiais com dimensões acima 2440 mm. Isso não era um procedimento comum. e) A realização de ações de controle da qualidade do produto por meio de inspeções feitas visualmente ou com ferramentas de mediações para madeira, f) processos de acabamento com pintura, g) lixamento, h) aplicação de massa corretiva em pequenos furos e fissuras, além da i) aplicação de tratamentos preservantes, não mencionado em bibliografias de produção do LVL em razão da não utilização de proteções

químicas em produtos fabricados no mercado internacional. Abordadas com maior detalhamento nas subseções seguintes.

4.1.3 Processo de fabricação das chapas de LVL

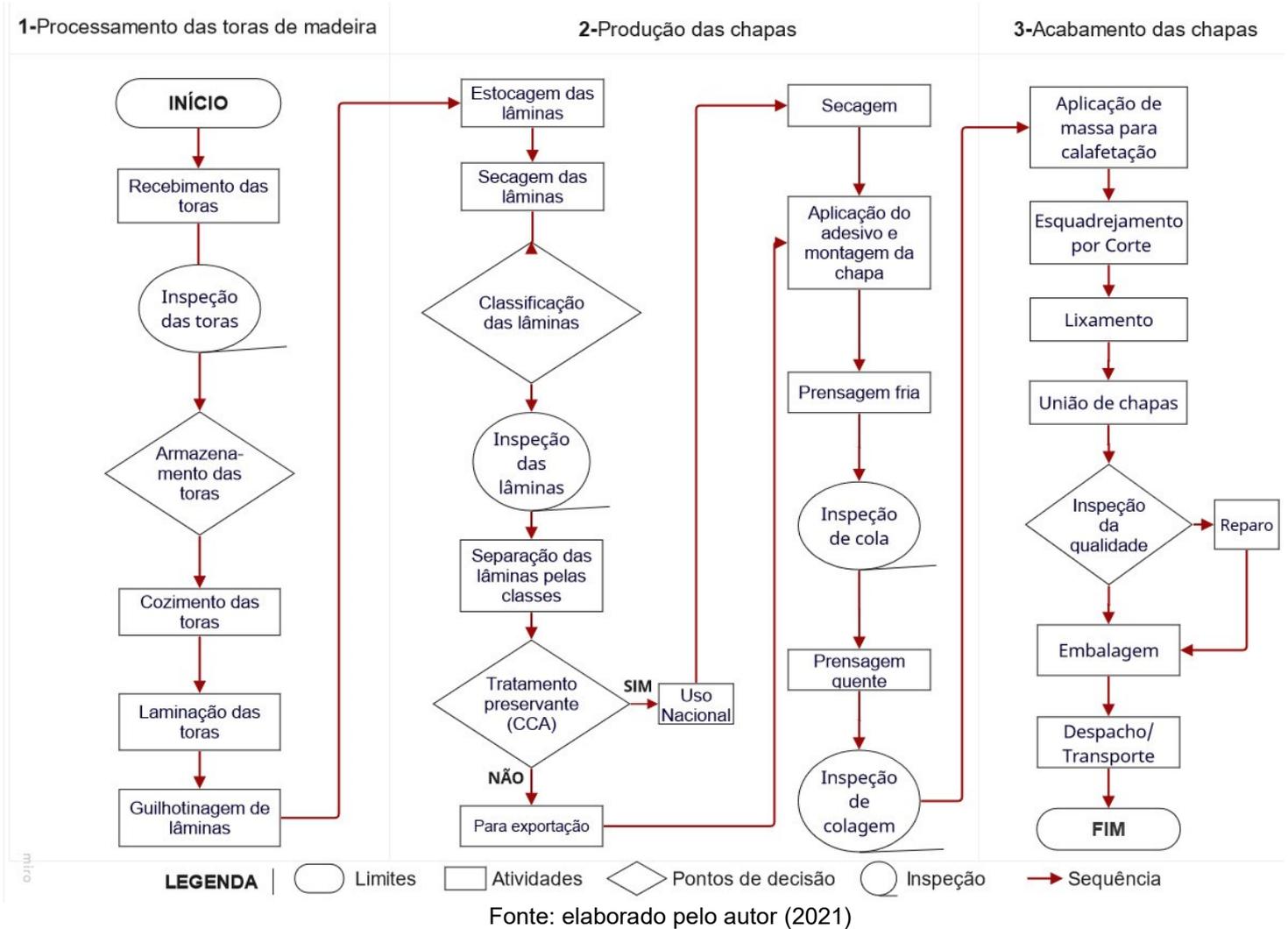
O processo pode ser organizado em três fases principais. São elas: processamento das toras de madeira, seguido da produção das chapas e do acabamento final delas. Ele está representado pelo fluxograma apresentado na Figura 14.

A primeira fase consiste no processamento da madeira (Figura 13), nos edifícios 6, 5 e 4 (Figura 12). Ele envolve o recebimento, a inspeção, o armazenamento, o cozimento e a laminação das toras, bem como a guilhotinagem das lâminas. O recebimento, a inspeção e o armazenamento são realizados no edifício 6 (Figura 12). O cozimento ocorre no edifício nº 5, enquanto que a laminação das toras ocorre no edifício nº 4 (Figura 12).

A segunda fase do processo produtivo compreende a produção das chapas de LVL (Figura 14) e desenvolve-se nos edifícios 1 e 3 (Figura 12). Ele consiste nas seguintes etapas: estocagem, secagem, classificação e inspeção das lâminas, pré-montagem, aplicação de tratamentos preservantes, secagem, aplicação do adesivo, montagem das chapas, prensagem a frio, inspeção de distribuição da cola, prensagem a quente e checagem da fixação/colagem das lâminas.

A terceira e última fase compreende o processo de acabamento das chapas (Figura 13) e localiza-se no edifício nº 1 (Figura 12). Ela é composta pelas etapas: aplicação da calafetação, esquadrejamento por corte, lixamento, união das chapas, inspeção da qualidade da chapa, possíveis reparos, embalagem e despacho do produto.

Figura 13- Fluxograma do processo de produção do LVL



A documentação do processo produtivo, realizada com o auxílio de registros fotográficos e ferramentas gráficas como mapofluxogramas e fluxogramas, revela que as literaturas científicas descrevem o processo de forma superficial, resume as etapas de fabricação e não fornece aprofundamento técnico.

4.1.4 Avaliação do processo de fabricação das chapas de LVL

As etapas de todo o processo produtivo levantando por meio das metodologias de mapeamento, são descritas e avaliadas em detalhe a seguir.

4.1.4.1 Fase 1- Processamento das toras de madeira

A fase de processamento das toras de madeira é composta pelas etapas de: recebimento, inspeção, armazenagem, cozimento e laminação dessas toras, além, da guilhotinagem das lâminas.

a) Recebimento, inspeção e armazenamento de toras

O recebimento das toras ocorre com a chegada dos caminhões que transportam o material da madeireira até a planta da fábrica, onde é feita a pesagem da carga e a inspeção visual dos lotes. Durante a inspeção das toras, é observada a presença ou não de galhos, a uniformidade do tronco, a presença de anéis na superfície de rachaduras e de fungos azuis. Evita-se ao máximo a presença de galhos com diâmetros acima de 20 mm, que provoquem falhas no rendimento na etapa de laminação da tora. As toras preferidas são as que possuem dimensões, aparência e idades o mais uniformes possíveis e que não possuam rachaduras que provoquem perdas da matéria-prima. As toras não devem possuir cor azulada, por causar problemas no processo de colagem ou de empenamento das chapas de LVL, em razão de ser uma região afetada por patologia de fungos que provocam a degradação da madeira (MAGALHÃES, 2005).

O cumprimento desses requisitos mínimos de qualidade das toras é assegurado pelo fornecedor das toras, a fim de evitar o transporte de material com potencial de descarte. Ainda que os padrões de qualidade das toras fornecidas sejam acordados entre a empresa e o fornecedor, a empresa realiza uma nova inspeção visual no momento de recebimento das toras para garantir o recebimento de materiais conforme as características físicas acordadas com o fornecedor, a fim de garantir uma boa matéria-prima na produção de laminados. Contudo, segundo Bortoletto Júnior (2006), o método visual pode não garantir total confiabilidade da madeira em razão da superficialidade da metodologia de checagem.

Os procedimentos de controle adotados pela empresa de laminados de madeira durante o recebimento, seguem basicamente o recomendado pela literatura conforme o item 2.3.1 (LVL *HANDBOOK EUROPE*, 2019). Em contrapartida, a aplicação de uma avaliação da madeira por meio da utilização de equipamentos para a realização de testes destrutivos, feitos por ensaios mecânicos e por métodos não-

destrutivos como o de ultrassom podem ser aplicados com a retirada de 9 a 12 amostras como o recomendado pela ABNT NBR 7190 (1997). A empresa não realiza esse tipo de avaliação da madeira, entretanto a implementação desses testes pode atribuir maior confiabilidade na seleção das toras utilizadas na produção das chapas de LVL. Segundo Bortoletto Júnior (2006), a realização de testes físico-mecânicos em laboratório possibilita melhor caracterizar a madeira e estabelecer os parâmetros necessários de manipulação dentro do processo produtivo.

O armazenamento na fábrica das toras aprovadas na inspeção é feito por empilhamento, em contato direto com o solo e a céu aberto por, no máximo, 72 horas até o início do processo de transformação da produção. Segundo Nogueira (2017), o contato direto da madeira com a umidade do solo e a exposição às intempéries, pode causar alterações nas propriedades físicas e mecânicas do material, com potencial de afetar negativamente a eficiência do processo produtivo das chapas de LVL. Assegurar um armazenamento adequado das toras de madeira, pode exercer forte influência na garantia da qualidade do material utilizado na produção dos laminados. A cobertura e o empilhamento sobre plataforma elevada das toras são ações para melhor adequar as condições de estocagem do material.

b) Cozimento de toras

O cozimento das toras na empresa é feito pelo método a vapor durante 14 a 16 horas, a 80 °C. As toras possuem comprimento de aproximadamente 2,60 m e diâmetro entre 30 e 80 cm. Para esse método de cozimento, Keinert, Júnior e Alberto (1992), citado por Nogueira (2017), recomendam a temperatura ideal de aquecimento de 60 °C, durante 18 a 20 horas, para o amolecimento ideal na obtenção de lâminas com faces livres de irregularidades em ambas as regiões do lenho em matéria-prima do gênero de *Pinus*. No método de cozimento a vapor, o ar é transferido para a madeira por convecção e por condução, pelo confinamento do ar quente sobre as madeiras que são cobertas por lonas, e provocando o cozimento do material.

Tanritanir *et al.* (2006) afirmam que, devido à variação do diâmetro das toras, o método a vapor pode não fornecer um aquecimento adequado a todas elas para um mesmo período de cozimento. Além disso, a relação do tempo de cozimento é outro fator que pode prejudicar a eficiência dos procedimentos subsequentes. O processo de cozimento a vapor não fornece eficiente uniformidade de distribuição do calor sobre

densos volumes de toras. Em contrapartida, no método de cozimento por imersão, as toras são submetidas por um procedimento de uniforme penetração do calor por meio do mergulho do material em água aquecida. Uma maneira de melhorar o processo de cozimento das toras é separar as toras em lotes de mesmo diâmetro e estabelecer condições de tempo e de temperatura que permitiam o cozimento adequado de acordo com essas dimensões.

O equilíbrio entre o tempo, a temperatura e o diâmetro das toras são fatores que podem exercer influência na qualidade da laminação. A etapa de cozimento promove o amolecimento, e proporciona uma melhor penetração da faca nas toras. Em razão disso reduz o custo de manutenção do equipamento ao diminuir o impacto e evitar maiores desgastes da ferramenta laminadora no momento de contato com as toras já amolecidas (NOGUEIRA, 2017).

c) Laminação e guilhotinagem das lâminas

As toras de madeira são posicionadas no maquinário de laminação, onde ocorre o encaixe da faca que realiza o corte. Inicialmente, é feito o descascamento da superfície das toras, a fim de descartar a capa protetora externa, que diminui o seu volume inicial. Com o nivelamento externo da circunferência da tora, em seguida, inicia-se o faqueamento com o encaixe da faca sobre a tora, que realiza a laminação. Em seguida, realiza-se a guilhotinagem, que consiste no corte do tapete laminado para transformá-lo em lâminas individuais de dimensões padronizadas de 1200 mm de largura e 1200 ou 3200 mm de comprimento (Figura 14). As lâminas de madeira usadas na formação das chapas de LVL são fabricadas com espessuras que variam entre 2,5 a 4,0 mm padronizados pela empresa. A espessura é conferida na produção com o auxílio de um paquímetro de resolução em 0.1 mm.

Figura 14- Toras (a), tapete de lâminas (b) e guilhotinagem de lâminas (c).



Fonte: acervo do autor (2022)

A garantia de um bom desempenho do processo de laminação está atrelado à qualidade das toras e da sua preparação até o desdobramento composto pelo armazenamento e cozimento adequado ao tipo de tora que será laminada. Na empresa analisada, a regulagem das facas da laminação das toras é feita apenas no início do expediente de trabalho, o que pode não assegurar uma uniformidade de espessura ao longo do comprimento do tapete de lâminas durante o procedimento de laminação, devido à falta do controle de posição da faca. Em sua maioria, a desregulagem da faca no processo de faqueamento é ocasionada pelo impacto agressivo dos troncos no momento de encaixe durante o corte. Ela causa descartes significativos de madeira que poderia ser utilizada na obtenção de lâminas durante o processo de laminação (IWAKIRI, 2005).

Na maioria dos casos, perdas de madeira no processo de laminação implicam na redução significativa do volume inicial processado. Elas estão relacionadas ao diâmetro e à conicidade das toras e ao seu tempo de cozimento. Fatores de regulagem

do maquinário e decisões tomadas pelo operador do torno têm influência direta no rendimento de lâminas e na geração de resíduos nessa etapa (SOZO *et al.*, 2017). A padronização do diâmetro das toras e o treinamento dos operadores da máquina laminadora pode exercer melhorias no rendimento de produção das lâminas.

O corte automatizado da guilhotina controla as dimensões das lâminas de madeira. Durante o processo de corte, ocorrem pequenas variações de tamanho, que são corrigidas na etapa de esquadrejamento por corte feito no acabamento final da chapa conforme as dimensões padronizadas pela empresa. Após o descascamento das toras e, ocasionalmente, a guilhotinagem, todos os resíduos de madeira são reutilizados como combustível na caldeira, a qual produz energia para aquecer a prensa usada na prensagem à quente das chapas de LVL.

4.1.4.2 *Fase 2 - Produção das chapas de LVL*

A fase de produção das chapas de LVL compreende, basicamente, a sobreposição e a fixação das lâminas. Esta fase é constituída pelas etapas de: estocagem, secagem e classificação das lâminas, inspeção do teor de umidade, pré-montagem da chapa, aplicação de tratamento preservante (quando necessário), secagem das lâminas tratadas, montagem da chapa, aplicação do adesivo, pré-prensagem e prensagem a quente. Essas etapas são apresentadas a seguir.

a) Estocagem e secagem das lâminas

As lâminas são estocadas, em ambiente coberto e arejado, umas sobre as outras em pilhas de até 6 m de altura, compostas entre 600 a 800 unidades, até serem direcionadas para a etapa de secagem (Figura 15). Durante a estocagem, as lâminas ficam protegidas de agentes naturais como a chuva e o Sol, contudo não se realiza o controle do teor de umidade do material. Esse controle pode ser eficaz em fornecer a quantidade de água presente no material como forma de melhor controlar possíveis influências desse fator quando as lâminas forem submetidas as etapas subsequentes do processo produtivo (SANTOS, 2008). A estocagem com o controle de umidade do material, é uma alternativa de melhor assegurar a qualidade das lâminas utilizadas na produção, em razão do teor de umidade exercer influência na eficiente aderência do adesivo e na fixação entre os laminados durante o processo de colagem (MULLER,

2009). Como forma propositiva, estudar a influência do teor de umidade na produção e nas propriedades finais das chapas de LVL podem melhor assegurar a qualidade da matéria-prima utilizada na fabricação do produto laminado.

Figura 15- Estocagem das lâminas de madeira



Fonte: acervo do autor (2022)

No processo de secagem utilizado pela empresa, as lâminas são colocadas sobre esteiras que entram em uma câmara secadora e lá permanecem por cerca de 25 min a uma temperatura entre 100 a 165 °C (Figura 16). Isso resulta em um material com teor de umidade final médio de 8 a 14%. Este valor está acima do teor de umidade especificado na literatura. Santos (2008) descreve que a secagem deve ser feita no tempo adequado de 25 min a lâminas que possuam de 1,0 a 4,0 mm de espessura, em temperaturas entre 80 e 165 °C. O intervalo do teor de umidade apresentado pelas lâminas mostra que é necessário padronizar o tempo e a temperatura da secadora com base nas espessuras das lâminas para reduzir as variações de umidade do material e obter um produto laminado com maior qualidade

Figura 16- Secagem das lâminas de madeira



Fonte: acervo do autor (2022)

A quantidade total de lâminas produzidas para a formação de chapas de LVL pode ser impactada pelo teor de umidade encontrado nas lâminas de madeira, visto que elas divergem dos valores recomendados pela literatura (HASELEIN e PAULESKI, 2004).

Às vezes, no processo produtivo da empresa, a temperatura e o tempo de passagem das lâminas realizados pelo equipamento de secagem não são controlados devidamente. Isso pode comprometer a qualidade de secagem das lâminas, em razão do uso de temperaturas não correlacionadas adequadas à espessura das lâminas, o que pode ocasionar secagens excessivas ou ineficientes em materiais laminados com diferentes teores de umidade. Iwakiri (2005) e Muller (2009) descrevem que a regulagem das temperaturas e dos tempos de secagem aplicados pela máquina secadora, devem ser ajustados tomando como base a espessura das lâminas que serão secas.

b) Classificação e inspeção do teor de umidade das lâminas

Na empresa produtora das chapas de LVL, a classificação das lâminas é realizada apenas por meio visual considerando como base a presença de avarias nas peças, conforme os parâmetros estabelecidos na norma americana PS1-19 (Tabela 6).

Tabela 6- Critérios de classificação visual das lâminas adotados pela empresa de chapas de LVL são baseados na norma americana PS1-19

Classificação das lâminas	Nós sólidos (perpendicular às fibras)	Defeitos abertos (buracos)	Casca	Rachadura	Áreas quebradas
A&N	Não apresenta	Não apresenta	Não apresenta	Não apresenta	Não apresenta
B	25 mm	Não apresenta	Não apresenta	1 mm	Não apresenta
C+	38 mm	6 mm × 13 mm	Não apresenta	3 mm (Largura máxima)	6 mm × 13 mm
C	38 mm	38 mm Buracos de nós (Perpendicular às fibras)	38 mm × 203 mm	13 mm (Metade do painel) 10 mm (painel inteiro)	38 mm × 152 mm
D	76 mm	76 mm Buracos de Nós (Perpendicular às fibras)	76 mm × 203 mm	25 mm	76 mm × 152 mm

Fonte: PS1 (2019) adaptado pelo autor (2022)

No processo de classificação, os trabalhadores retiram as lâminas da secadora, realizam uma rápida observação e classificam o material em classes de qualidade por meio da identificação visual da quantidade e qualidade de defeitos presente nas lâminas. Este processo é orientado por um cartaz que contém sumariamente as informações sobre os tipos e dimensões de defeitos e suas classificações (Figura 17).

Figura 17- Pôster de orientação para classificação

Classificação da Lâmina	Nº de Nós	Defeitos Abertos	Casca	Rachadura	Áreas Quebradas
D	76	76 x 203 mm	76 x 203 mm	25	76 x 152 mm
C	30	30 x 203 mm	30 x 203 mm	10	30 x 152 mm
C _p	30	13	Não Permitido	3	6 x 13
B	2	Não Permitido	Não Permitido	1	Não Permitido
A & N	Não Permitido				

Nós de Classificação D Quanto grande é um nó? (do lado da face de cima, porzent mil de 100cm)

Nós de Classificação C

Observações sobre nós e buracos de nós

Fonte: acervo do autor (2022)

O processo de classificação visual é superficial porque depende da avaliação das percepções dos funcionários (Figura 18). Segundo Bortoletto Junior (2006), esse tipo de avaliação pode resultar em análises inconsistentes das propriedades e das classes de qualidade atribuídas a cada lâmina classificada.

Figura 18- Lâminas classificadas por aparência superficial



Fonte: acervo do autor (2022)

O controle de qualidade das lâminas é uma etapa essencial para garantir maior estabilidade do material quando submetidos às etapas subsequentes de colagem das

lâminas. As etapas de secagem, colagem e classificação das lâminas são as únicas que tem o controle do teor de umidade presente no processo de produção. Para isso, um medidor de umidade portátil para madeira, modelo M51 (Figura 19), é usado. O equipamento é posicionado sobre a lâmina e são efetuadas medições em 3 pontos: nas duas extremidades e no centro do material laminado. A utilização de medidores por contato fornece apenas um quantitativo aproximado do teor de umidade identificado na região de toque no material. O método não fornece exatidão do valor que corresponda a realidade de todo comprimento da lâmina, e não assegura confiabilidade para uma eficiente medição do material avaliado (LOPES *et al.*, 2017).

Figura 19- Medidor de umidade para madeira portátil – M51



Fonte: Marrari automação (2021)

- c) Organização das lâminas de acordo com as diferentes classes de qualidade para a montagem das chapas.

A empresa de produtos laminados adota a prática de agrupar laminados para a organização das chapas, permitindo a composição de laminados de diferentes classes. Esse método possibilita a seleção dos tipos e dos níveis de qualidade dos laminados que serão utilizados na formação das chapas. Essa abordagem desempenha um papel fundamental na criação de chapas que podem ser constituídas por laminados de mesma classe de qualidade ou mesmo por lâminas de classes distintas. Em situações em que os produtos requerem maiores resistências mecânicas, é necessário incorporar um maior número de lâminas de melhor qualidade. Por outro lado, as chapas que não exigem níveis significativos de resistência podem ser produzidas por meio da técnica de formação multilaminada

(MULLER, 2009). Além disso, a separação também orienta a escolha dos laminados que serão submetidos ao tratamento químico preservante em autoclave.

A empresa produz chapas com todas as lâminas de mesma classe de qualidade e também de classes de qualidade diferentes. Essa composição é definida pela capacidade físico-mecânica que o produto necessita desempenhar para a sua utilização na construção civil, solicitadas pelo cliente e especificadas em projeto. Durante a separação das lâminas pelas 5 classes de qualidade (A, B+, B C e D), elas são empilhadas em lotes com 150 a 200 lâminas e organizadas sobre plataformas de aço elevadas a 30 cm do chão de acordo com a classificação atribuída a elas (Figura 20).

Figura 20- Lâminas secas, separadas e empilhadas



Fonte: acervo do autor (2022)

d) Tratamento preservante e secagem de lâminas tratadas

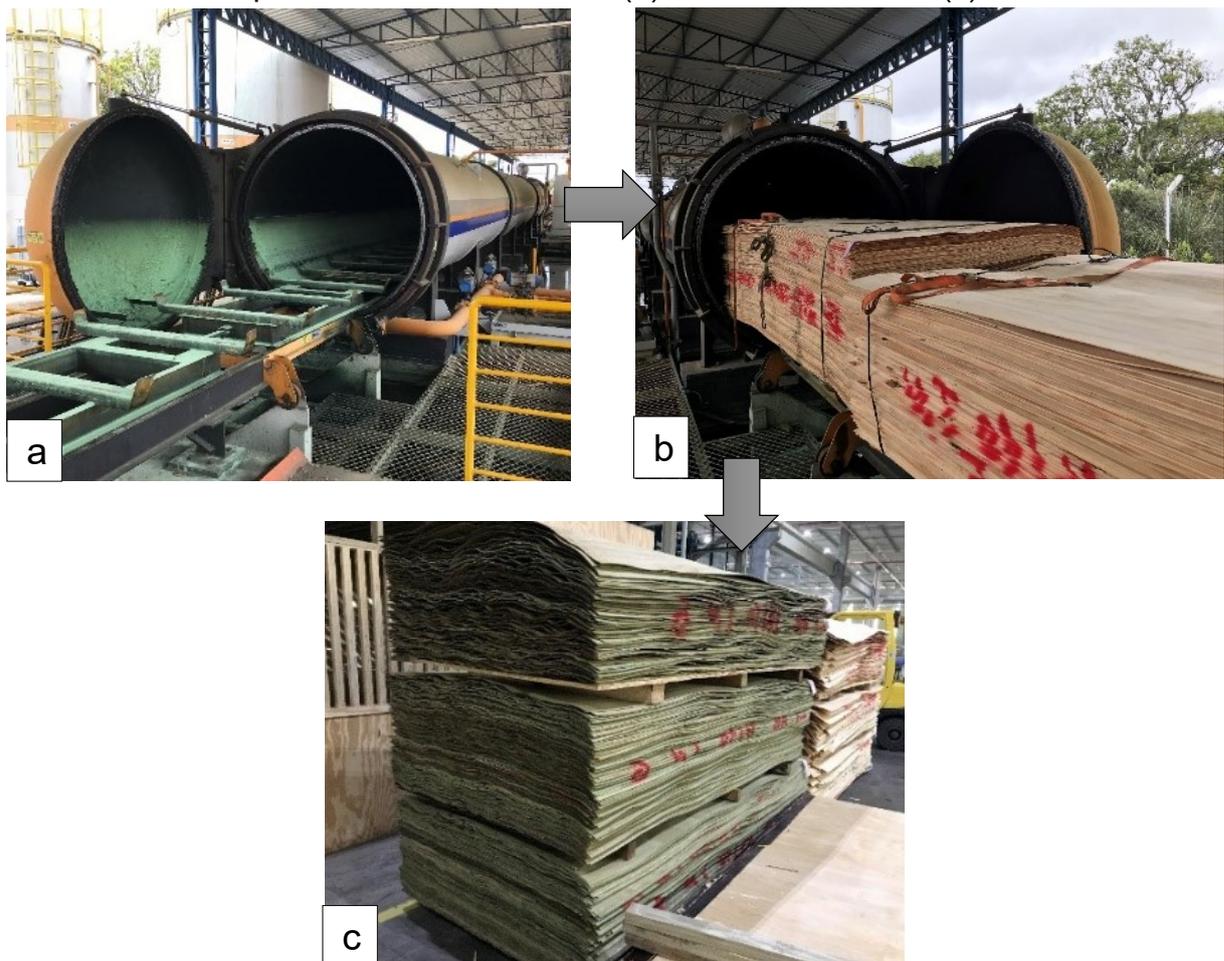
Na etapa de tratamento preservante, apenas as lâminas usadas para a produção de produtos destinados ao mercado nacional recebem esse tratamento. Chapas destinadas à exportação não são tratadas em razão de restrições feitas pela legislação de alguns países, para o transporte de materiais que possuem solução química na sua composição (INDUSTRIAL CHEMICALS ACT, 2019).

A empresa cuja fabricação foi analisada utiliza o preservante *Chromated Copper Arsenate-CCA* para a preservação do LVL. Ele é aplicado por meio do sistema de autoclave pelo método de célula cheia (Figura 21 a). O teor de preservante na aplicação varia entre 13 a 24 Kg por m³ de madeira, 1 % de concentração da solução preservante, 1,85 g/cm³ de densidade do produto preservante, durante 2 a 3 horas de

confinamento na autoclave. A pressão utilizada na autoclave é de 5,88 MPa, com variação de retenção de ingredientes ativos, abaixo de 4,0 kg i.a/m³ (Figuras 21 a,b). Posterior à aplicação do preservante, é feita a secagem do material tratado nas mesmas condições aplicadas na etapa de secagem (subseção 4.1.4. 2.1) (Figura 21 c).

Para o tratamento do material, a empresa segue apenas alguns parâmetros especificados pela norma ABNT NBR 16143 (2013), que apresenta os seguintes parâmetros de tratamento: um total de madeira tratável em 13 m³, a concentração de solução 1%, densidade do produto de 1,85 g/cm³, o tempo de aplicação em 2 horas, a pressão de tratamento 6,0 kgf/cm² e retenção de ingredientes ativos de 4,5 a 6,5 kg i.a/m³.

Figura 21- Aplicação de tratamento preservante em autoclave: autoclave (a), lâminas que receberão tratamento (b) e lâminas tratadas (c).



Fonte: acervo do autor(2022)

No procedimento de aplicação do preservante nas lâminas, foi identificado um nível de retenção dos ingredientes ativos de 4,5 kg i.a/m³, abaixo da quantidade mínima recomendada pela norma. O tempo de aplicação manteve-se acima de 2 horas, que categoriza um excessivo período de tratamento, além da quantidade de material que apresentou variações acima do indicado para uma eficiência na distribuição da proteção química entres as lâminas tratadas. Essas variações podem exercer influência negativa na garantia da qualidade do procedimento de preservação do produto laminado. Como forma preventiva, é necessário estabelecer medidas de controle do cumprimento dos parâmetros necessários para assegurar a qualidade das chapas, as quais não realizadas pela empresa. Essas medidas são para evitar possíveis variações e falhas na proteção do produto de LVL e diminuição da sua vida útil (OLIVEIRA, 2016).

e) Aplicação do adesivo e montagem das chapas

O adesivo para a colagem das lâminas é aplicado sobre as duas superfícies do material por meio de um rolo mecanizado à temperatura ambiente. As chapas são montadas manualmente em concomitância com a aplicação da cola. A primeira lâmina é posicionada sem adesivo, seguida da sobreposição, de forma intercalada, de uma lâmina com o adesivo sobre os dois lados. Essa sequência é aplicada, até que ocorra a conclusão de montagem da chapa (Figura 22). A literatura não aborda a realização do procedimento de aplicação do adesivo nas lâminas.

Figura 22- Aplicação do adesivo por rolo (a) e montagem das chapas (b)



Fonte: acervo do autor (2022)

Na empresa, é utilizado o adesivo de fenol-formaldeído para colagem das lâminas, por se tratar do adesivo indicado para colagem de materiais a base de madeira. A empresa prepara apenas a quantia de adesivo utilizada na aplicação diária e não realiza qualquer tipo de armazenamento em ambiente com controle de temperatura e umidade.

Na composição do adesivo, utilizam-se como extensores da resina um total entre 50% e 70% de água e 70% a 90% de trigo do tipo 2-B misturado sobre a proporção da quantidade de preparo do adesivo. A empresa trabalha com 36 a 38% de sólidos totais, apresentando uma porcentagem abaixo do mínimo recomendado pela literatura (SANTOS, 2016). O pH segue o mesmo entre 11 e 13, medido por equipamento de medição de pH, Phmetro, e viscosidade de 420 cP, dentro da média recomendada. Sempre que retirada a cola da máquina de mistura do adesivo pelo supervisor do setor de colagem. Esses parâmetros estão em conformidade aos indicados por Santos (2016) para o do adesivo fenol-formaldeído. Segundo ele, o teor de sólidos do adesivo deve situar-se entre 48 e 51%, o pH entre 11 e 13 e viscosidade entre 300 e 600 cP.

Santos (2016) recomenda que o adesivo possua vida útil e armazenagem de 4 a 5 meses, sob condições à temperatura de 20 °C. O controle da dosagem de cola realizado pela empresa, é feito por meio de testes de aplicação do adesivo em lâminas que são pesadas e comparadas entre seu peso inicial e final. A gramatura utilizada na colagem das chapas de LVL corresponde em 320 e 410 g/m³, a qual está abaixo da faixa de 420 e 480 g/m³, indicada por Matos (1997) e por Pedrosa (2003) para colagem de lâminas de *Pinus taeda*. Recomenda-se fazer uma avaliação periódica da resistência da linha de cola das chapas produzidas em decorrência da baixa gramatura usada na aplicação do adesivo.

f) Prensagem a frio (pré-prensagem) e inspeção de cola

São utilizadas 2 prensas que realizam a etapa de prensagem a frio com a função de espalhar a cola sobre a superfície das lâminas o mais uniforme possível (Figura 23). Na prensagem a frio ou pré-prensagem das chapas de LVL, são prensadas de 3 a 4 chapas, compostas de 9 a 11 lâminas cada uma, sobrepostas sobre as faces sem a aplicação de adesivo para a posterior separação delas. A prensagem dura entre 15 e 18 min sob pressão de 3,43 a 5,88 MPa. O tempo de

prensagem está, entre 70% a 75% abaixo do recomendado pela literatura, o qual é de 60 min (MULLER, 2009). Segundo Muller (2009), tempos de prensagem inferiores a 40 min são ineficazes e podem causar problemas de qualidade e de durabilidade da fixação entre as lâminas que compõem a formação da chapa de LVL. Além disso, podem causar a formação de bolhas de ar entre as linhas de cola do produto laminado e patologias de descolamento (MULLER, 2009).

Figura 23- Prensagem a frio e inspeção de cola



Fonte: acervo do autor (2022)

Após prensada a chapa, é feita a inspeção visual do processo de colagem da chapa, verificando a ocorrência do sangramento do adesivo, o qual confere o espalhamento da cola sobre todo material. Essa observação permite a constatação do espalhamento da cola, mas não assegura a sua uniforme distribuição por toda extensão da lâmina. A testagem de escoamento de cola e da resistência ao cisalhamento pode conferir maior confiabilidade do espalhamento da cola.

A quantidade de chapas produzidas diariamente e a necessidade de cumprir prazos curtos de entrega do produto acabado explicam o curto tempo de colagem utilizado pela empresa analisada. A gestão de tempo e do processo de colagem precisam ser aprimoradas de forma que possibilite o cumprimento do tempo de prensagem a frio adequadamente e também o cumprimento dos prazos de entrega do produto.

g) Prensagem a quente e inspeção de colagem

A prensagem a quente é realizada por um maquinário composto por pratos aquecidos que realizam a aplicação de altas temperaturas sobre as superfícies do material. O calor transferido do prato da prensa pelo contato entre as lâminas, realiza a cura do adesivo e a fixação final entre as camadas laminadas em função do tempo e da temperatura adotado no processo (Figura 24). O tempo de prensagem a quente é essencial para uma adequada aderência entre as lâminas. Ele deve ser o menor possível para melhorar a eficiência do processo e permitir a cura da resina adesiva (MOHAMMAD *et al.*, 2022).

Figura 24- Prensa de prensagem a quente



Fonte: acervo do autor (2022)

A empresa de chapas de LVL define o tempo de prensagem em função do número de lâminas que compõe as chapas. Ela adota o tempo de 1 min por lâmina que compõe chapas. Observou-se que, na prensagem de 11 lâminas, adota-se o tempo de prensagem de 11 min. Seguindo esse critério, o tempo de prensagem adotado pela empresa é inferior ao tempo de 25 a 30 min, recomendado pela literatura para a prensagem de chapas com 11 lâminas de *Pinus taeda*, coladas com resina

fenol-formaldeído e pode ser uma das principais causas do problema de delaminação das chapas (PEDROSA, 2003; MULLER, 2009; MULLER *et al.*, 2015).

No processo de fabricação, a empresa usa temperaturas de 130 a 135 °C para a cura do adesivo. No entanto, para a prensagem de laminados de madeira de *Pinus taeda* colados com resina de fenol-formaldeído, Tammela (1998), Pedrosa (2003), Gabriel (2007), Muller (2009) e Mohammad *et al.* (2022) recomendam as temperaturas de 135 e 140 °C para a prensagem a quente de chapas com 10 e 11 lâminas. Isso indica a necessidade de aumentar o período de prensagem para melhor adequar e assegurar a eficiência do processo de colagem.

4.1.4.3 Fase 3 - acabamento das chapas de LVL

A fase final de acabamento das chapas de LVL é composta pelas etapas de: calafetação, esquadrejamento por corte, lixamento da chapa, união de chapas quando necessários materiais com comprimentos maiores que o padrão de produção, inspeção da qualidade, reparo da chapa (quando necessário), embalagem e despacho do produto.

a) Calafetação, esquadrejamento e lixamento da chapa

A etapa de calafetação consiste na aplicação de uma massa corretiva por dois trabalhadores da produção durante 3 a 5 min para uniformizar e cobrir furos ou fissuras na chapa. Esse processo é feito manualmente e a massa é curada com um período de descanso de 10 a 20 min. Após a calafetação, a chapa é submetida ao esquadrejamento. Nesta etapa, as laterais da chapa são cortadas para ajustar as medidas às dimensões comerciais, com faces e bordas uniformes e nas medidas solicitadas pelo cliente ou padronizadas pelo fabricante. As dimensões das chapas são de 1220 mm × 2440 mm.

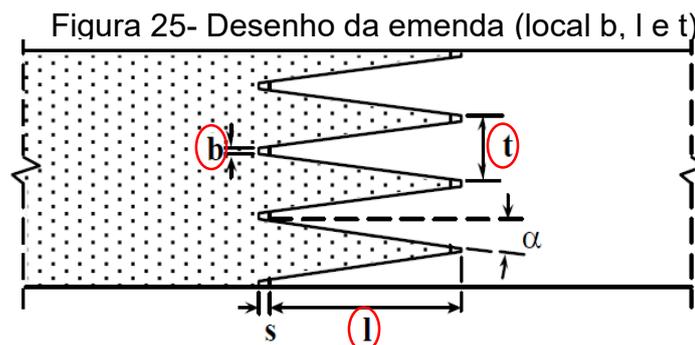
A empresa utiliza o equipamento de esquadrejadeira com avanço da serra automatizado para aplainar as chapas. Esse processo ocorre por meio do lixamento com lixas com granulometria de 36 a 150 gm aplicada nas duas faces do material. Não há especificação normalizada para esse procedimento em chapas de LVL. O único requisito é assegurar a padronização das dimensões finais do produto fabricado pela empresa.

b) União de chapas (*finger joint*)

As emendas das chapas de LVL são utilizadas para produzir produtos com dimensões maiores que as dimensões da chapa mãe. Eles são, destinados para aplicações estrutural e não-estrutural na construção civil. Quando necessário, são realizadas emendas dentadas (*finger joint*), coladas com adesivo polivinílico (*Advantage EP-950 A DEV*).

Para a eficaz união entre os dentes, é preciso obter equilíbrio geométrico através das proporções entre as dimensões da base dos dentes e seu comprimento. A geometria da emenda utilizada pela empresa produtora das chapas de LVL apresenta as seguintes características: 35 mm de comprimento do entalhe (l); 1,2 mm de espessura da extremidade do dente (b), 7,8 mm de passo dos dentes (t) e 15% de grau de enfraquecimento (v) (Figura 25). Szücs *et al.* (2015) ainda recomendam espaçar as emendas uma da outra, no mínimo, 20 vezes a espessura da lâmina. Quando centralizada em uma peça, espaçar, no mínimo, 12 vezes a espessura da lâmina.

Os parâmetros de união das chapas para uso estrutural e não estrutural adotados pela empresa, seguem os valores determinados pela norma DIN 68140. Ela define as dimensões adequadas para os entalhes e o grau de enfraquecimento "v".



A pressão de colagem usada na fabricação das emendas é de: 9,80 MPa, para chapa com espessura de 45 mm; 1,27 MPa, para chapas de 60 mm de espessura; 1,47 MPa, para 75 mm, e 1,66 MPa, para 90 mm, com tempo de cura por 6 horas (Tabela 7). O recomendado pelo fabricante do adesivo é que a pressão de colagem seja de 5 MPa. Os fabricantes de adesivos dos países da América do Norte e da Europa recomendam a pressão entre 1,66 a 4,90 MPa, de forma que 6,86 MPa pode

ser aplicado em qualquer caso de dimensão e tipo de cola utilizada (SZÜCS *et al.*, 2015). A empresa cujo processo produtivo foi avaliado apresenta adequação para a pressão e para o tempo de prensagem.

Tabela 7- Parâmetros da pressão de colagem usados pela empresa produtora de chapas de LVL

Espessura da chapa (mm)	Pressão de colagem (MPa)	Tempo de cura
45	9,80	6 horas
60	1,27	
75	1,47	
90	1,66	

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

c) Inspeção da qualidade, reparo da chapa, embalagem e despacho do produto acabado

Todas as chapas de LVL são submetidas ao processo de inspeção da qualidade, os parâmetros observados são: presença de descolamento, espessura fora do padronizado, formação de bolsas de ar na chapa, erros de corte, amasso, rachaduras, falhas laterais, quebra, queima, bolor e fora de esquadro. A presença desses fatores indica a necessidade de reparos, considerados de pequena proporção e caracterizados por soluções práticas e possíveis de serem feitas manualmente. A definição de aplicação dos reparos é feita após a avaliação visual de profissional habilitado do setor da qualidade da empresa, o qual determina a necessidade de realizar um lixamento com o uso de lixas de granulação menor que àquela aplicada pela lixadeira industrial, de aplicação de verniz ou de pintura.

Após os reparos mínimos, quando necessário, e depois do produto aprovado, as chapas são limpas e embaladas em lotes no próprio galpão de fábrica, sem qualquer controle de condições de umidade e de temperatura do ambiente. O material de embalagem é o plástico cristal transparente (filme *stretch*) composto por polietileno, conforme o recomendado pelo LVL *Handbook Europe* (2019), que indica a necessidade de embalar as chapas para a proteção contra sujeiras, umidade e possíveis danos no transporte. Os lotes são amarrados com fita poliéster, como forma de unir o material em pacotes resistentes para a proteção durante o manuseio e transporte.

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DA MADEIRA *PINUS TAEDA* UTILIZADA NA PRODUÇÃO DA CHAPA DE LVL

A caracterização das propriedades físico-mecânica da madeira de *Pinus taeda* usada para a fabricação do LVL foi feita por meio da determinação da densidade aparente, da estabilidade dimensional, das resistências à compressão paralela e perpendicular às fibras, dos módulos de elasticidades à compressão paralela e perpendicular às fibras, da dureza Janka e da resistência ao fendilhamento (Tabela 8), que são discutidos nas subseções a seguir. Todos os parâmetros dimensionais e de usinagem das amostras são apresentados no item 3.2.

Tabela 8- Propriedades físico-mecânica da madeira *Pinus taeda*

Ensaio	Propriedade	Média	DP	CV	CPs
Umidade (%)	Teor de umidade - TU	17	0,33	2	
Densidade a 12% de TU (kg/m ³)	Densidade aparente	483	4,3	8,8	
Estabilidade (%)	Retração radial	4,2	0,27	6,4	42
	Retração tangencial	5,16	0,26	5,15	
	Inchamento radial	4,39	0,29	6,67	
	Inchamento tangencial	5,45	0,3	5,43	
	Varição volumétrica	9,13	0,4	5,24	
Compressão paralela às fibras (MPa)	Tensão máxima	32	45	15	13
	Módulo de elasticidade	5442	2964	5	
Compressão perpendicular às fibras (MPa)	Tensão máxima	10	1	9	13
	Módulo de elasticidade	9493	410	4	
Dureza (MPa)	Axial	210	11	5	15
	Tangencial	319	22	7	
	Radial	228	3	1	
Fendilhamento (MPa)	Resistência	0,30	0,05	15,41	15

CPs: corpos de prova; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

4.2.1 Densidade aparente

A densidade média aparente da madeira de *Pinus taeda* é de $483 \pm 4,3$ kg/m³. Este valor encontra-se próximo a 520, 410 e 436 kg/m³ e encontrados por Almeida *et al.* (2014), Mustefaga *et al.* (2019) e 436 kg/m³ e Liz e Cunha (2020), respectivamente. A madeira utilizada neste estudo e a dos autores citados são de faixa etária juvenil com idade entre 12 e 20 anos. Embora a classificação da madeira em classes de resistência, conforme a especificação da norma ABNT NBR 7190-2:2022, dependa de

vários parâmetros a serem cumpridos simultaneamente, o material analisado apresenta a densidade média superior a 400 kg/m^3 , valor mínimo estabelecido para a classe de resistência 2. Segundo Vivian *et al.* (2015), a densidade é um indicador de potencialidades do uso na produção de produtos, e exerce influência no comportamento do material dentro do processo de industrialização.

4.2.2 Ensaio de estabilidade dimensional

As retrações médias radial e tangencial do *Pinus taeda* foram de 4,20% e 5,16%, respectivamente, enquanto que os valores médios dos inchamentos radial e tangencial foram de 4,39 % e 5,45 %, respectivamente. Trianoski *et al.* (2013) obtiveram as médias para o inchamento nas faces radiais e tangenciais de 4,92% e 6,29%, respectivamente.

Trianoski *et al.* (2013), Ribeiro *et al.* (2019) e Liz e Cunha (2020) obtiveram médias para retração radial de 3,38%, 4,67% e 3,88%, respectivamente. A média de retração radial deste estudo foi 0,2% superior ao resultado médio de 4,0% encontrados na literatura. O maior resultado encontrado por Ribeiro *et al.* (2019) para retração radial pode ser relacionado com espécie de madeira e com tratamento térmico aplicado na mesma, que alteram suas propriedades físicas. Os valores de retração radial foram 10% menores do que os de Ribeiro *et al.* (2019), mostrando que o *Pinus taeda* catarinense é mais estável dimensionalmente em comparação com outras madeiras estudadas pelos autores.

A retração tangencial do *Pinus taeda* apresentou média de 5,16%, inferiores aos valores de 6,44%, 5,89% e 5,71%, encontrados por Trianoski *et al.* (2013), Ribeiro *et al.* (2019) e Liz e Cunha (2020), respectivamente. Para os inchamentos radial e tangencial este estudo apresentou médias inferiores aos encontrados na literatura, ainda que testados para caracterização da madeira de *Pinus taeda*. Entre a média deste estudo e as apresentadas pelos autores, o inchamento radial apresentou um desvio padrão de 0,3% e para o tangencial em 0,5% de dispersão.

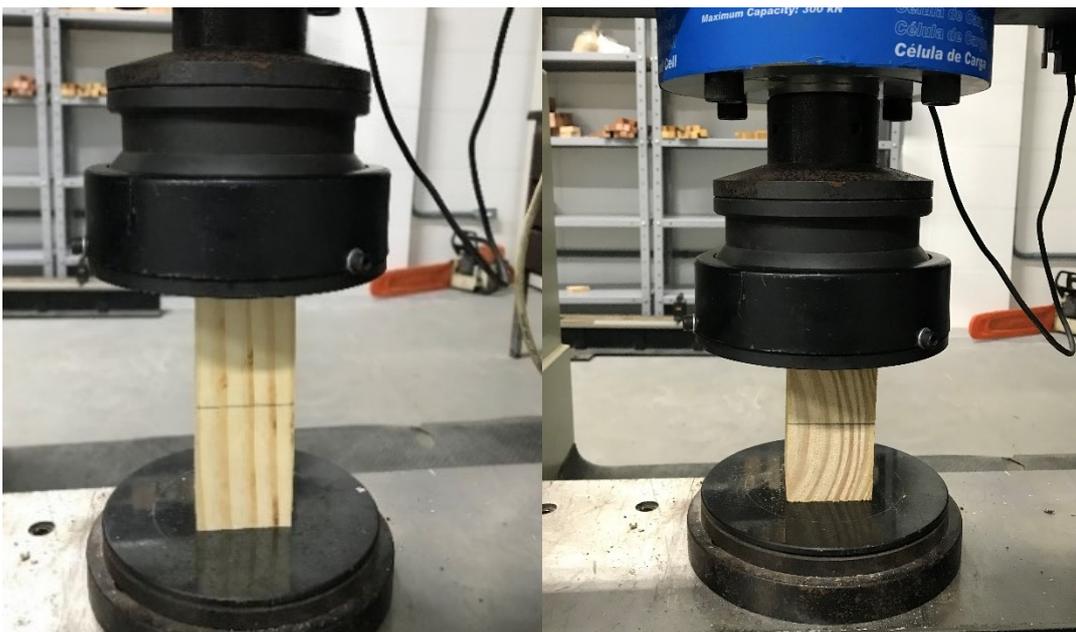
A variação volumétrica média do *Pinus taeda* catarinense utilizada pela empresa analisada foi de 9,13%, indicando uma melhor estabilidade dimensional que as madeiras da mesma espécie estudadas por Trianoski *et al.* (2013) e Liz e Cunha (2020), as quais apresentaram os valores médios de 10,64% e 9,65%,

respectivamente. As madeiras avaliadas nos 3 estudos tinham idade de 12 anos, o que classifica o material na faixa etária juvenil.

4.2.3 Resistências à compressão paralela e perpendicular às fibras

As resistências médias à compressão paralela e perpendicular às fibras do *Pinus taeda* foram de 32 ± 5 MPa e de 10 ± 1 MPa, respectivamente, sendo as resistências característica de 23 e de 8 MPa, respectivamente (Figura 26). A resistência à compressão paralela às fibras situa-se na faixa de 28,5 a 37 MPa, encontrada por Mustefaga *et al.* (2019) e Trianoski *et al.* (2014), enquanto que a resistência média à compressão perpendicular às fibras apresentou o mesmo valor encontrado por Andrioni (2019) e por Mayard *et al.* (2022). A resistência média à compressão perpendicular às fibras do *Pinus taeda* foi superior a resistência de 7,52 MPa, encontrada por Mustefaga *et al.* (2019) para a mesma espécie de madeira. Adicionalmente, a madeira usada na fabricação das chapas de LVL apresenta resistência característica superior ao valor estipulado pela norma ABNT NBR 7190:2022, Parte 2, a classe de resistência 1 de madeiras do gênero de *Pinus spp*, a qual é de 22 MPa.

Figura 26- Teste para determinação da resistência à compressão paralela e perpendicular às fibras da madeira de *Pinus taeda*



Fonte: acervo do autor (2022)

4.2.4 Dureza Janka

As durezas Janka médias obtidas nas direções axial, tangencial e radial foram de 210 ± 11 , 319 ± 22 e 228 ± 3 MPa, respectivamente. Na direção axial, este estudo apresentou a menor média entre aquelas encontradas por Mustefaga *et al.* (2019) e Liz e Cunha (2020), de 240 e 282 MPa, respectivamente. Em contrapartida, para a direção tangencial, este estudo obteve média entre os valores de 575 e 245 MPa encontrados por Mustefaga *et al.* (2019) e Liz e Cunha (2020). Para a direção radial este estudo apresentou a maior média sobre 208 e 195 MPa apresentadas pelos mesmos autores, respectivamente (MUSTEFAGA *et al.*, 2019; LIZ e CUNHA, 2020), indicando desempenho mecânica superior do *Pinus taeda* catarinense. A madeira avaliada por Mustefaga *et al.* (2019) apresenta a mesma faixa etária juvenil do *Pinus taeda* catarinense, o que pode explicar a proximidade dos seus valores médios entre os demais descritos na literatura.

4.2.5 Resistência ao fendilhamento

A resistência média ao fendilhamento do *Pinus taeda* foi de $0,3 \pm 0,05$ MPa, a qual é inferior aos valores encontrados na literatura. Mascarenhas *et al.* (2013) obtiveram o valor médio de 0,4 MPa e Borges (2017) de 0,5 MPa. Mascarenhas *et al.* (2013) avaliaram a madeira adulta com DAP superior a 40 cm, com 530 Kg/m^3 , em plantios florestais homogêneos de *Pinus taeda* o que explica o valor superior encontrado. A madeira estudada por Borges (2017) apresenta densidade aparente de 414 Kg/m^3 , inferior à média encontrada do *Pinus taeda* catarinense de 483 Kg/m^3 , esse fator, pode influenciar nas médias de resistência ao fendilhamento do material.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE LVL

A caracterização físico-mecânica das chapas de LVL foi feita a partir da determinação dos módulos de elasticidade e de ruptura à flexão estática, da resistência à compressão paralela às fibras, das resistências ao cisalhamento da linha de cola e à tração das emendas dentadas e determinação da delaminação da linha de cola (Tabela 9).

Tabela 9- Valores resultantes do ensaio de caracterização físico-mecânica da chapa de LVL de *Pinus taeda*.

Ensaio	Propriedade	Média	DP	CV	Nº CPs
Flexão estática (<i>edgewise</i>)	MOE (MPa)	6893	411	6	9
	MOR (MPa)	52	8	15	
Compressão paralela	Tensão máxima (MPa)	36	3	8	13
	Linha Superior (19 CPs)	2,8	0,5	17,5	52
Cisalhamento da linha de cola	Linha Central (19 CPs)	3,3	0,7	20,6	
	Linha Inferior (14 CPs)	2,8	0,5	16,4	
	Todas as Linhas	3,0	0,6	19,7	
Tração das emendas dentadas	Tensão Máxima (MPa)	34	7	22	15
Delaminação	Linhas de Cola (%)	Não Delaminou nenhuma linha de cola			14

CPs: corpos de prova; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

4.3.1 Relação carga x deslocamento na flexão estática (*edgewise*)

A Tabela 10 apresenta uma síntese dos resultados das médias, os desvios padrão e os coeficientes de variação do módulo de elasticidade e de ruptura à flexão estática da chapa de LVL. Os resultados completos da avaliação dessa testagem são apresentados no Apêndice D.

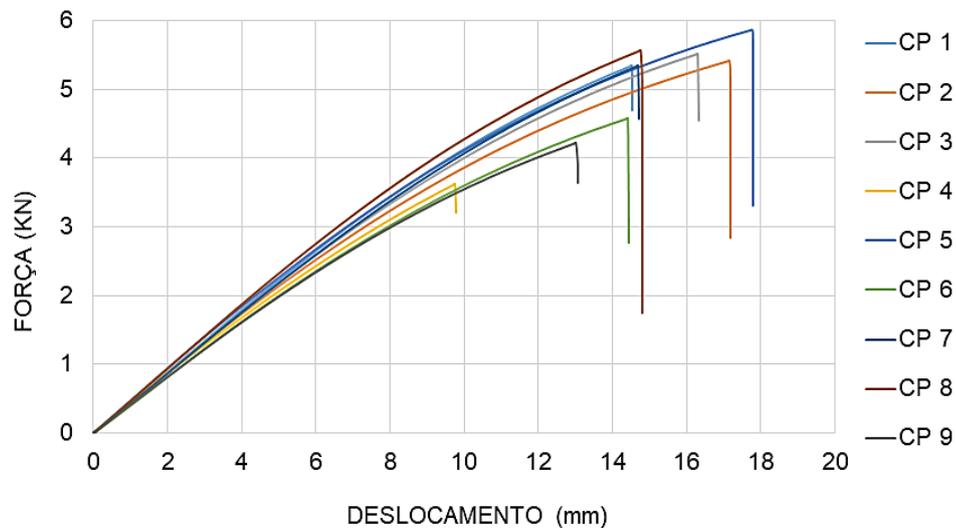
Tabela 10- Resultados do ensaio de flexão estática (MOE e MOR)

Corpos de prova	Carga máxima (N)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Média	5055	6893	52
Desvio Padrão	742	411	8
Coeficiente de variação (%)	14	6	15

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A Figura 27 apresenta as curvas força × deslocamento do LVL testado no ensaio de flexão a 3 pontos. Observa-se que as curvas apresentam o mesmo comportamento, porém com deslocamento de ruptura diferentes.

Figura 27- Gráfico de força × deslocamento na testagem de flexão



4.3.2 Módulos de elasticidade e de ruptura à flexão (MOE e MOR)

O módulo de elasticidade na flexão (MOE), por meio do ensaio a 3 pontos, apresentam valores mínimos e máximos entre 6300 a 7600 MPa, respectivamente, e média igual a 6893 ± 411 MPa, enquanto que os valores do módulo de ruptura (MOR) ficaram entre 36 a 59 MPa, resultando em uma média de 52 ± 8 MPa.

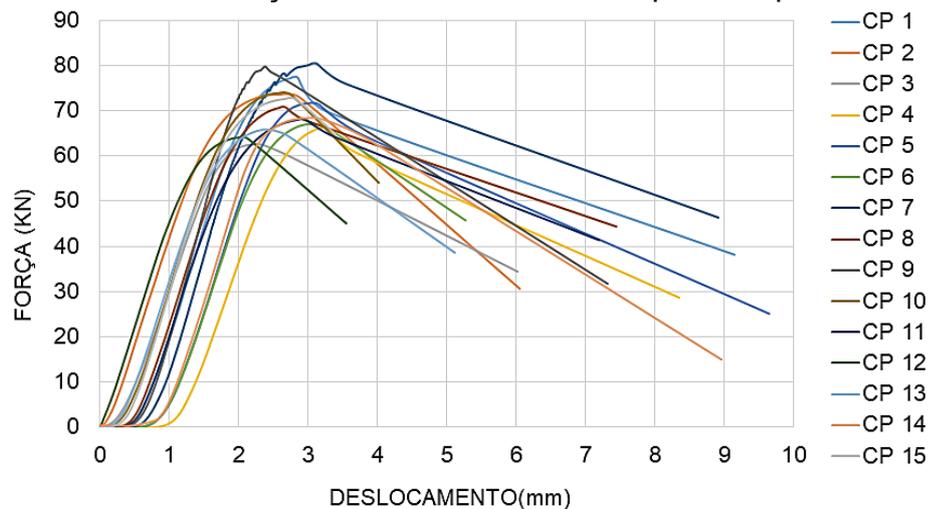
O valor do MOE foi superior aos valores encontrados por Lima *et al.* (2013) e por Buligon *et al.* (2015), que foram de 5339 MPa e de 5068 MPa, respectivamente, e foram da mesma ordem de grandeza do valor obtido por Nogueira (2017) em um ensaio de flexão a 4 pontos, cujo valor foi de 6939 MPa. Contudo o valor do MOR foi inferior aos valores obtidos por Lima *et al.* (2013) e por Buligon *et al.* (2015), de 74 e 89 MPa, respectivamente, mas superior ao valor encontrado por Nogueira (2017), de 25 MPa.

A diferença entre os resultados desta pesquisa e os obtidos por Buligon *et al.* (2015) pode ter sido causada pelos parâmetros do ensaio, visto que os ensaios realizados por eles seguiram o procedimento da norma ASTM D 3043, que adota dimensões dos corpos de prova e de ensaio diferentes aos determinados pelas normativas brasileiras. As propriedades físico-mecânicas da matéria prima, bem como o tratamento preservante podem justificar a diferença dos valores encontrados

4.3.3 Resistência à compressão paralela às fibras

A Figura 28 apresenta as curvas força × deslocamento dos corpos de prova de LVL em *Pinus taeda*. Observa-se os deslocamentos da travessa no momento da ruptura situam-se entre 3 e 9 mm. A resistência média à compressão paralela às fibras do *Pinus taeda* foi 36 ± 3 MPa, a qual é igual a obtida por Nogueira (2017) para o *Pinus spp*, cujos corpos de prova foram testados segundo os mesmos parâmetros normativos. Por meio de testes realizados segundo as prescrições do projeto de norma ABNT NBR 31:000.05-001:2004 adaptadas para compensados, Lima *et al.* (2013) encontraram o valor médio de 48 MPa, sendo superior à média deste estudo. Essa diferença pode estar associada ao tamanho do corpo de prova de 120 mm adotado por Lima *et al.* (2013), devido às limitações do equipamento de ensaio.

Figura 28- Gráfico de força × deslocamento na compressão paralela às fibras



Fonte: acervo do autor (2023)

4.3.4 Resistência ao cisalhamento das linhas de cola

A Tabela 11 apresenta os valores das resistências médias da linha de cola do *Pinus taeda*. As médias obtidas ficaram entre 2,8 MPa e 3,3 MPa, apresentando igualdade ao valor encontrado por Nogueira (2017) e proximidade ao determinado por Lima (2013) de 3,7 MPa, ambos também testados para a madeira serrada de *Pinus spp*. Isso indica que a chapa de LVL apresenta resistência similar àquela encontrada na literatura. As linhas de cola localizadas nas partes inferior e superior do corpo de prova apresentaram a resistência média ao cisalhamento de 2,8 MPa, com variação

do desvio padrão de 0,5 MPa e do coeficiente de variação entre 16 e 18%. A linha central apresentou a maior média de $3,3 \pm 0,7$ MPa (Tabela 11). Os resultados da avaliação das linhas de colas são apresentados no Apêndice E.

Tabela 11- Valores das resistências ao cisalhamento na linha cola

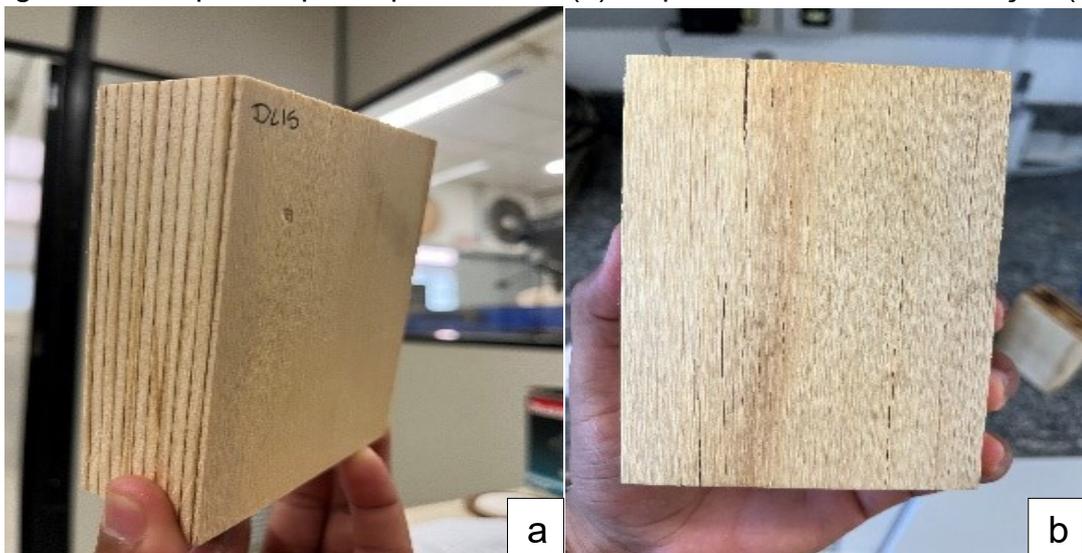
Resultados	Linha de cola superior	Linha de cola central	Linha de cola inferior
Média (MPa)	2,8	3,3	2,8
Desvio padrão	0,5	0,7	0,5
Coeficiente de variação (%)	18	21	16

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

4.3.5 Delaminação nas linhas de cola

Os corpos de prova de LVL fabricados com *Pinus taeda* e colados com adesivo fenol-formaldeído com lâminas na horizontal não apresentaram delaminação durante os ensaios, apenas pequenas fissuras superficiais nas lâminas localizadas nas capas externas da chapa (Figura 29), diferentemente dos corpos de prova de Nogueira (2017), que apresentaram uma porcentagem média de 0,35% de descolamento. A não delaminação da chapa confere qualidade ao produto laminado, em razão dessa patologia ser uma das mais recorrentes nesse tipo de sistema engenheirado (TIMPONI, 2017).

Figura 29- Corpos de prova para o teste (a) e após o teste de delaminação (b)

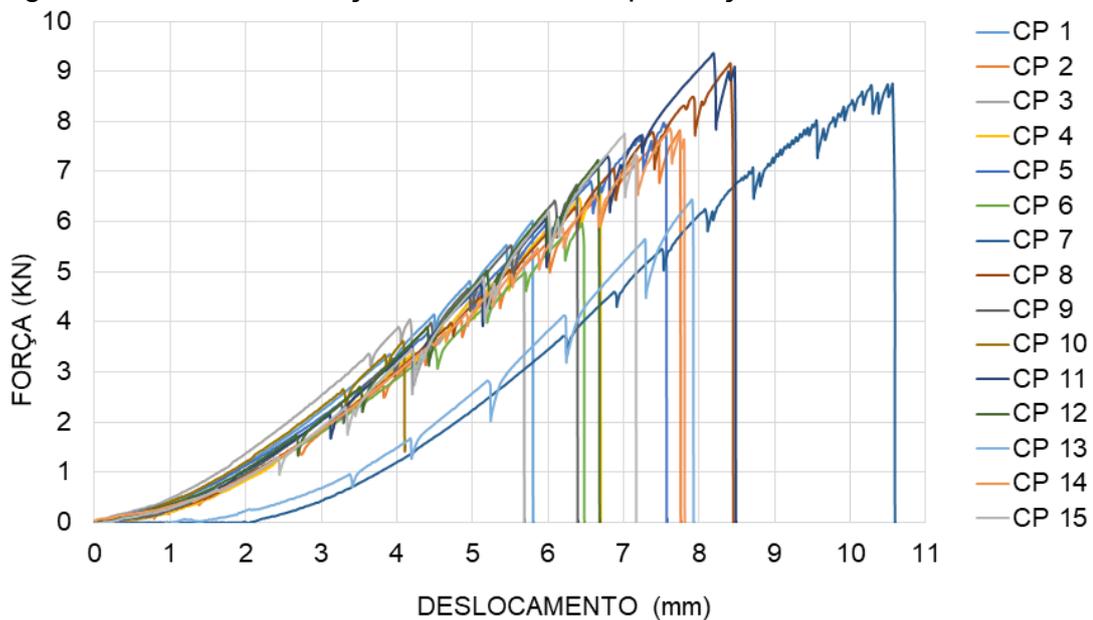


Fonte: acervo do autor (2023)

4.3.6 Resistência à tração das emendas dentadas

A Figura 30 apresenta o gráfico de força × deslocamento do LVL submetido a uma carga de tração gradualmente crescente até a fratura da amostra. A resistência média à tração foi de 34 ± 7 MPa, enquanto Nogueira (2017) em 2 grupos de uniões dentadas, em madeira maciça, obteve os valores médios de 35 ± 9 e de 38 ± 7 MPa. Eles foram próximos aos valores encontrados a partir dos corpos de prova oriundos das chapas de LVL fabricados pela empresa analisada.

Figura 30- Gráfico de força × deslocamento por tração nas emendas dentadas



4.4 DIAGNÓSTICOS E RECOMENDAÇÕES

O levantamento *in loco* do processo produtivo adotado pela empresa catarinense fabricante de chapas de LVL permitiu identificar as não conformidades e os possíveis fatores que influenciam negativamente na qualidade das chapas produzidas, os quais estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5- Parâmetros utilizados pela empresa, indicados na literatura e recomendações para melhoria

(continua)

FASE 1 – Toras de madeira				
Parâmetros	Empresa	Literatura	Fonte	Recomendações
Idade das toras	A partir de 12 anos	Toras aptas para uso após os 12 anos	Vivian <i>et al.</i> (2022)	Uso de árvores com idade em torno de 30 anos, classificada na fase adulta.
Inspeção da tora	Inspeção visual dos defeitos	Inspeção visual de identificação de defeitos no material	Bortoletto Júnior (2006)	Uso de equipamentos na empresa como: um calibrador de diâmetro de toras, paquímetro, medidor de umidade e de nós e equipamento de raio-X. Aplicação de teste para identificação das propriedades físico-mecânica da madeira normalizados e detalhados pela ABNT NBR 7190 (2022).
Tempo de cozimento das toras	10 a 14 horas	20 horas	Tanritanir <i>et al.</i> (2006)	O tempo de cozimento das toras adotado pela empresa é inferior ao recomendado pela literatura. Sugere-se a realização de estudos para a determinação do tempo de cozimento em função do diâmetro das toras usadas.
Temperatura de cozimento das toras	80 °C	60 °C	Keinert, Júnior e Alberto (1992)	Realização de estudos para a determinação da combinação tempo x temperatura para o <i>Pinus taeda</i> . Sugere passar de 10 a 14 h em 80 °C adotado atualmente, para 20 horas em 60 °C.
Tempo de secagem das lâminas	25 min	20 min	Santos (2008) e Muller (2009)	Regulagem do tempo para cada lote de espessura das lâminas que serão secas. 20 min para as lâminas com espessura a partir de 10 mm.
Temperatura da secagem (equilíbrio de umidade) das lâminas	80 a 165°C	100 a 165°C	Santos (2008)	Aumentar a temperatura mínima utilizada na secadora para lâminas a partir de 10 mm. Isso deve ser determinado a partir de um estudo técnico financeiro.
Teor de umidade médio final das lâminas	8 e 14%	3 e 8%	Haselein e Pauleski (2004)	O teor de umidade das lâminas de madeira é superior ao recomendado. Sugere-se aprimorar o processo de secagem das lâminas, por meio de um estudo para a determinação dos tempos e temperaturas adequados para cada espessura de lâmina.

Quadro 5 – Parâmetros utilizados pela empresa, indicados na literatura e recomendações para melhoria

(continua)

FASE 2 – Produção das chapas de LVL				
Parâmetros	Empresa	Literatura	Fonte	Recomendações
Total de madeira para ser tratada em autoclave	Variável (entre 12 e 13 m ³)	13 m ³	ABNT NBR 16143 (2013)	Padronizar a quantidade recomendada de m ³ de madeira ao estabelecido pela norma, além de, monitorar a execução do procedimento de aplicação do tratamento para evitar que variações indesejadas nesse parâmetro.
Tempo de aplicação do produto preservante	Entre 2 e 3:30 h	2 horas	ABNT NBR 16143 (2013)	Seguir o tempo padrão, com base no cumprimento dos demais parâmetros
Retenção de ingredientes ativos no tratamento preservante	Abaixo de 4,5 kg i.a/m ³	4,5 a 6,5 kg i.a/m ³	ABNT NBR 16143 (2013)	A retenção de ingredientes ativos nos tratamentos é inferior ao recomendado pela norma brasileira. Recomenda-se seguir os parâmetros recomendados pela norma ABNT NBR 16143 (2013) para a preservação da madeira e desenvolver protocolos de testes para o monitoramento e identificação dos fatores que influenciam a ocorrência das variações de retenção de ingredientes ativos que estejam fora do indicado pela norma.
Teor de Sólidos de sólidos do adesivo	36 a 38%	48 a 51 %	Santos (2016)	Aumentar o teor de sólidos e realizar testes da porcentagem se necessário.
Tempo de prensagem a frio das lâminas (formação da chapa)	10 a 15 min	60 min	Muller (2009)	O tempo de prensagem a frio adotado é inferior ao recomendado na literatura. Sugere-se o aumento do tempo de prensagem para garantir uma melhor aderência entre as lâminas prensadas
Tempo de prensagem a quente das lâminas (formação da chapa)	1 min para cada lâmina que compõe a chapa	25 min/ chapas com 40 mm	Pedrosa (2003)	Chapas de 40 mm recebem de 11 a 12 lâminas. O tempo de prensagem adotado pela empresa não atende o mínimo recomendado pela literatura para chapas da mesma espessura. Sugere-se aumentar o tempo de prensagem a quente das chapas laminadas
Faixa de temperatura de prensagem a quente das lâminas (cura do adesivo)	130 e 135 °C	135 e 140 °C	Tammela (1998), Pedrosa (2003), Gabriel (2007) e Muller (2009)	A faixa de temperatura para a prensagem a quente das lâminas está levemente abaixo da faixa recomendada pela literatura. Sugere-se o aumento da temperatura mínima utilizada atualmente.

Quadro 5 – Parâmetros utilizados pela empresa, indicados na literatura e recomendações para melhoria

(conclusão)

FASE 3 – Acabamento das chapas de LVL				
Parâmetros	Empresa	Literatura	Fonte	Recomendações
<i>Finger joint</i> -comprimento dos entalhes (mm)	35 mm	Estrutural: 7,5 a 60 mm Não estrutural: 4 a 35 mm	Norma DIN 68 140	A empresa cumpre com os parâmetros recomendados pela norma DIN 68 140. Eles se enquadram em ambas as aplicações, seja estrutural ou a não estrutural
<i>Finger joint</i> - espessura da extremidade de um dente (mm)	1,2 mm	Estrutural: 0,2 a 2,7 mm Não estrutural: 0,4 a 1,2 mm	Norma DIN 68 140	
<i>Finger joint</i> - passo dos dentes (mm)	7,8 mm	Estrutural: 2,5 a 15 mm Não estrutural: 1,6 a 10 mm	Norma DIN 68 140	
<i>Finger joint</i> - grau de enfraquecimento (%)	15%	Estrutural: 8 a 18% Não estrutural: 25 a 20%	Norma DIN 68 140	

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

4.4.1 Diagnóstico do processo produtivo do LVL

O processo de produção das chapas LVL envolve diversas etapas interligadas. Se uma dessas etapas for interrompida devido ao não cumprimento dos requisitos técnicos de produção, isso pode desencadear um efeito em cascata na linha de produção. No processo de produção avaliado, há várias etapas que requerem aprimoramento, incluindo o cozimento e a laminação das toras, a classificação das lâminas, a aplicação do adesivo, a prensagem a frio e a prensagem a quente. É essencial seguir efetivamente as recomendações técnicas de execução das etapas produtivas.

A aplicação do método PDCA de melhoria da qualidade do processo, possibilita realizar a gestão para melhoria contínua do processo produtivo das chapas de LVL. Como proposição para potencializar a produção de chapas de LVL é importante desenvolver propostas de otimização do processo produtivo, investigar novos materiais ou tecnologias.

4.4.2 Considerações sobre a madeira de *Pinus taeda*

A matéria-prima utilizada pela empresa na fabricação das chapas de LVL apresentou resultados positivos quanto às suas propriedades físico-mecânicas, mesmo se tratando de um material na faixa etária juvenil e no início da adulta, entre 12 a 20 anos de idade. Vivian *et al.* (2022) afirmam que a madeira de *Pinus taeda* com 30 anos de idade apresenta as melhores propriedades de uso para a produção de sistemas estruturais. Nesse contexto, a empresa deveria investir em fornecedores de florestas com idades superiores, para assegurar o uso de madeira com maior qualidade produtiva. Outra alternativa é realizar investigações de diferentes espécies *Pinus* afeta as propriedades físico-mecânicas do LVL como forma de mitigar alternativas de matérias-primas para a fabricação de chapas laminadas.

Os testes laboratoriais realizados nas propriedades da madeira revelam que o *Pinus taeda* catarinense demonstra uma estabilidade superior em comparação com outras madeiras da mesma espécie mencionadas na literatura. Os resultados médios obtidos demonstram que os valores se alinham com os requisitos mínimos estabelecidos pelas normas pertinentes, que tratam da caracterização da madeira

para uso em aplicações estruturais. Além disso, as médias de resistência encontradas neste estudo apresentam uma clara correlação com os resultados geralmente observados em testes semelhantes e com a espécie de madeira em questão. É importante destacar que a qualidade das chapas de madeira é diretamente influenciada pela qualidade da matéria-prima, mas também depende da eficiência das condições no processo produtivo.

4.4.3 Considerações sobre a chapa de LVL

Os ensaios realizados nas chapas de LVL revelaram dados que se aproximaram ou se igualaram aos resultados encontrados na literatura. Foi possível identificar uma notável semelhança nos valores médios das resistências, quando comparados a estudos anteriores. Em alguns casos, esses valores até superaram as resistências encontradas em caracterizações de madeira maciça. A superioridade nos valores médios das resistências das chapas de LVL sugere um grande potencial para o uso deste produto como parte de sistemas construtivos.

Por meio do teste realizado neste estudo, que avaliou a delaminação das lâminas nas chapas de LVL produzidas pela empresa catarinense analisada, os resultados indicaram que o material não apresentou descolamento durante o teste de aderência das linhas de cola. Conforme mencionado por Timponi (2017), no contexto de produtos constituídos por lâminas de madeira, a ocorrência de descolagem entre as linhas de cola é uma das problemáticas mais frequentes e significativas. Dado que a produção das chapas de LVL baseia-se principalmente na sobreposição e na colagem de lâminas, a ausência de delaminação praticamente assegura a qualidade e a eficácia do produto como um todo.

5 CONCLUSÕES

Após o mapeamento das etapas de fabricação e caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus taeda* e da chapa de LVL os resultados obtidos permitem concluir que:

- alguns parâmetros técnicos usados na produção das chapas de LVL não estão de acordo com a indicação da literatura, devendo ser realizada a adequação desses parâmetros às especificações da literatura técnica e das normas;
- a madeira do *Pinus taeda* usada para a fabricação da chapa mãe apresenta características compatíveis o seu uso, apresentando estabilidade dimensional superior às madeiras da mesma espécie indicada na literatura e resistências médias à compressão paralela e perpendicular às fibras de 32 ± 5 MPa e de 10 ± 1 MPa, respectivamente, e resistência média ao fendilhamento da madeira juvenil de 0,3 MPa, próxima aos valores encontrados na literatura para madeiras adultas da mesma espécie;
- apesar de não seguirem os parâmetros indicados na literatura para a colagem das lâminas, as chapas produzidas não apresentaram delaminação na linha de cola.
- os principais fatores que afetam a qualidade da chapa são o descumprimento dos parâmetros de fabricação das chapas de LVL e à ausência de supervisão da qualidade das toras utilizadas na produção dos laminados e da chapa acabada.

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, torna-se evidente a relevância de direcionar novas investigações. Essa abordagem visa expandir os estudos, proporcionando aprofundamentos mais abrangentes relacionados às diversas facetas das chapas de LVL. As sugestões para trabalhos futuros incluem:

- desenvolver propostas de otimização do processo produtivo da chapa de *Laminated Veneer Lumber (LVL) Pinus taeda*, visando aumentar a eficiência, reduzir custos e minimizar os impactos ambientais.

- investigar novos materiais ou tecnologias que possam ser incorporados ao processo de fabricação do LVL para melhorar suas propriedades físico-mecânicas, resistência e durabilidade.
- investigar como a escolha de diferentes espécies *Pinus* afeta as propriedades físico-mecânicas do LVL, considerando variações nas características da madeira, como densidade e resistência.
- estudar a influência do teor de umidade na produção e nas propriedades finais do LVL. Isso pode envolver experimentos para determinar a umidade ideal para a produção e avaliar como variações afetam o desempenho do material.

REFERÊNCIAS

ABIMCI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA. **Compensado de Pinus**. Catálogo técnico, nº1, 2002.

AGUIAR, A. V., SOUZA, V. A. & SHIMIZU, J. Y. Cultivo do pinus. Embrapa Florestas, 2ª edição, Sistema de Produção 5, ISSN 1678-8281, 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/Hrj7bv>>.

ANDRIONI, Camila Natália. **Estudo de caracterização física e mecânica da madeira Pinus Elliottii**. Orientador: Aldo Leonel Temp. 2019. 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia Civil, Alegrete, 2019.

AITIM. LVL: *producto estructural basado en chapas de madera*. **Boletín de Información Técnica (AITIM)**, Madrid, n. 198, p. 15-18, mar. / abr. 1999.

APA EWS STANDARD. PRL: 501: *performance standard for APA EWS laminated veneer lumber*. Tacoma, 2000. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Estudo Setorial 2013**: ano base 2012. Curitiba, 2013. 127 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **CB-02 2º PN revisão ABNT NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 12466-1: Madeira Compensada-Qualidade de colagem. Parte 1: Métodos de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. *NBR 7190*: projeto de estruturas de madeira (NBR 7190). Rio de Janeiro; 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projetos de estruturas de madeira - Rio de Janeiro, 2022. 93p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17002: Compensado-Requisitos e métodos de ensaio, Rio de Janeiro, 2021.

ATHANÁZIO-HELIODORO, J; LARA-PALMA H. A; BALLARIN, A. W. Painéis LVL de guapuruvu (*Schizolobium Parahyba* (Vell.) Blake). **Engenharia Industrial Madeireira: Tecnologia, Pesquisa e Tendências**. v 1, Cap 16, p 243-253, 2020.

BALLARINI, A. W.; PALMAII, H. A. L. **Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L.** 3. ed. Botucatu: Revista Árvore, 2003. 27 v. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622003000300014&script=sci_arttext&tlng=pt. Acesso em: 18Fev.2022.

BARNES, R. M. **Estudo de movimentos e de tempos: projeto e medida do trabalho**. 8ª edição. São Paulo. Edgard Blucher, 1977.

- BATISTA, G. R. *et al.* **Análise do processo produtivo: um estudo comparativo dos recursos esquemáticos.** In Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 26, Fortaleza. Anais... Ceará: ENEGEP 2006.
- BEKIR C. B. *Some physical and mechanical properties of reinforced laminated veneer lumber.* **Construction and Building Materials.** v 68, p 120-126, 2014.
- BENOIT P. G; HENRI B; HAO Z; ROBERT L. M. *Strength modelling of Laminated Veneer Lumber (LVL).* **Construction and Building Materials.** V 149, p 763-777, 2017.
- BLAZZON, J. C. *et al.* Resistência mecânica à adesão em superfícies de madeira de pinus aplainadas e unidas por adesivos PVAc. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, 2019.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and composites.** New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982. 712 p.
- BORBA, M. ENGENHARIA DO TRABALHO EPS 7022. Apostila direcionada à disciplina de Engenharia do Trabalho – EPS 7022, Universidade Federal de Santa Catarina Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, 2021.
- BORTOLETTO JÚNIOR, G. **Produção de lâminas, compensado e laminated veneer lumber – LVL a partir da madeira de *Pinus merkusii*.** 2006, 97 f. Tese (Livre-Docência em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- BOHLEN, J.C. *LVL laminated-veneer lumber: Development and economics.* **For. Prod. J., Madison**, v.22, n.1, p. 18-26, 1972.
- CALIL JR., C. *et al.* (2006). Manual de projeto e construção de pontes de madeira. ISBN: 85-98156-19-1. *Suprema*, São Carlos, 2006.
- CARVALHO, A. G. *et al.* Colagem da madeira de Pinus termoretificada. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 3, 2015.
- CARVALHO, A. M.; ROCCO LAHR, F. A.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. *Use of Brazilian eucalyptus to produce LVL panels.* **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 11, p. 61-4, 2004.
- DAVIS, G. *The performance of adhesive systems for structural timbers.* **International Journal Adhesion and Adhesives**, v. 17, n. 3-4, p. 247-255, 1997.
- DIAS, A. CARPINTERIA: **Carpinteria fecha parceria com empresa de vigas LVL**, 2019. Disponível em: <https://carpinteria.com.br/2019/01/15/carpinteria-fecha-parceria-com-empresa-de-vigas-lvl/> Acesso em: 23Jul.2021.
- _____. **EN 408: Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties.** Brussels, 2011.

_____. **EN 14080: Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Requirements.** Brussels, 2013.

FLORIAN, A. Preservativos de madeira e suas características. **Revista da Madeira.** Brasília. 127 ed. 2011.

FRIHART, C. R. *Wood Adhesion and Adhesives.* In: ROWELL, R. M (Ed.). **Handbook Wood Chemistry and Wood Composites.** Florida: CRC Press, 2005. cap. 9.

GABRIEL, M. S. C. **Desempenho físico-mecânico de painéis LVL de pinus tropicais da região de São Paulo.** 2007. ix, 125 f. Tese (doutorado) -Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2007.

GEORGE, M. L. **Lean Six Sigma for Service: How to Use Lean Speed and Six Sigma Quality to Improve Services and Transactions.** New York: The Mcgraw-hill Companies, 2003.

GOMEZ, B. J., HAUPT, R. *Wood Composite Adhesives.* Em: Pilato L. (eds) **Phenolic Resins: A Century of Progress.** Springer, Berlim, Heidelberg, 2010.

GONÇALVES, A. T. P.; ALMEIDA JUNIOR, J. Mapeamento de processos como ferramenta de identificação de fatores de impacto nas paradas não programadas do processo produtivo: estudo de caso em uma fábrica de cerâmica vermelha no estado da Paraíba. Anais do I Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, 2012.

GREEN, D.W.; HERNANDEZ, R. *Codes and standards for structural wood products and their use in the United States.* In: **FOREST PRODUCTS SOCIETY ANNUAL MEETING, 1998, Yucatan. Proceedings...Yucatan: North American Forestry Commission, 1998.** 14p.

HARRINGTON, H. J. *Aperfeiçoando Processos Empresariais.* São Paulo. Mkron, Books.1993.

HASELEIN, C. R., Cechin, E., Santini, E. J., & Gatto, D. A. (2000). Características estruturais da madeira de *Pinus elliottii* Engelm aos 30 anos de idade. **Ciência Florestal, 10(2), 135–144.**

HASELEIN, C. R.; PAULESKI, D. T. **Caderno didático da disciplina de Tecnologia da Madeira II – Parte I.** Santa Maria: Imprensa Universitária – UFSM, 2004. 73 p.

HASELEIN, C. R.; PAULESKI, D. T. **Caderno didático da disciplina de Tecnologia da Madeira II – Parte II.** Santa Maria: Imprensa Universitária – UFSM, 2004. 53 p.

HIGHLEY, T. L.; SCHEFFER, T. (1989). *Controlling decay in waterfront structures. Evaluation, Prevention, and Remedial Treatments.* United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. FPL-RP-494. Madison, WI, United States.

IBÁ 2022 (Indústria Brasileira de Árvores). **Relatório anual Ibá 2022**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf> Acesso em: 19Jan.2022

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 13910: Structural timber – Characteristic values of strength-graded timber- Sampling, full-size testing and evaluation**. Switzerland, 2013.

IWAKIRI, S. **Painéis de Madeira reconstituída**. FUPEF. Curitiba. 2005

JUNG, J. *Properties of parallel laminated veneer from stress-wave-tested veneers*. *Forest Products Journal*, Madison, v. 32, n. 7, p. 30-35, 1982.

JÚNIOR, M. D.; NUTTO, L.; HIGA, A. R. Rendimento de laminação por faca de toras de *Pinus taeda* L. *Yield of sliced veneer from Pinus taeda L. Logs*. *Scientia Forestalis*, v. 41, n. 100, p.469-475, 2013.

KEINERT JÚNIOR, S.; ALBERTO, M. M. M.; Influência de diversos tempos e temperaturas de prensagem em compensados fenólicos de *Pinus taeda*: efeitos sobre a resistência da colagem ao esforço de cisalhamento. **Ciência Florestal**, v. 2, n. 1, p. 67-79, 1992.

KIMBALL, K.E. Accelerated methods of drying thick-sliced and thin-sawed Loblolly pine. **For. Prod. J.**, Madison, v. 18, n.1, p.31-38, 1968.

KOCH, P.; WOODSON, G. E. Laminating butt-jointed, log run southern pine veneers into long beams of uniform high strength. *Forest Products Journal*, Madison, v. 18, n. 10, p. 45-51, 1968.

KOLLMANN, F. F. P.; COTE, W. A. Principles of wood science and technology. New York: **Springer-Verlag**, v.1. 1968.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. Principles of wood Science and technology – II. **Wood based materials**. New York: Springer-Verlag, 1975. 703p.

KRETSCHMANN, D. *et al. Effect of various proportions of juvenile wood on laminated veneer lumber*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1993. 31 p. (Research. paper FPL-RP-521).

LAUFENBERG, T. L. *Parallel-laminated veneer: processing and performance research review*. **Forest Products Journal**, Madison, v. 33, n. 9, p. 21-28, 1983.

LIMA, C. K. P *et al.* Características anatômicas e química da madeira de clones de *Eucalyptus* e sua influência na colagem. **Cerne**, v. 13, n. 2, p. 123-129, 2007.

LIU, S; WU, S; WANG, H. **Managing planted forests for multiple uses under a changing environment in China**. *N.Z. j. of For. Sci.* 44, S3, 2014.

LIZ, M. A. L.; CUNHA, B. A. **Propriedades físicas e mecânicas de árvores de *Pinus taeda* com lenho anormal de compressão.** 30º SIC UDESC, Seminário de Iniciação Científica, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2020.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; BORGES, C. G. A. Caracterização físico-mecânica da madeira de peroba-mica, *aspidosperma populifolium* a. dc. (apocynaceae). **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 38, n. 1, 2008.

LONGARAY, A. A.; LAURINO, F. C.; TONDOLO, V. A. G.; MUNHOZ, P. R. (2017). **Proposta de aplicação do ciclo PDCA para melhoria contínua do sistema de confinamento bovino: um estudo de caso.** *Sistemas & Amp; Gestão*, 12(3), 353–61, 2017.

LOPES, D. J. V. *et al.* Influências do diâmetro e umidade da madeira na qualidade do tratamento preservativo. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

LORENZON, E.; DIEDRICH, H. Utilização do MASP (Método de Análise e Solução de Problemas) em uma granja de suínos. **Revista Destaques Acadêmicos**, v. 11, n. 1, 2019.

LUTZ, J. F. *Wood Veneer: log selection, cutting and drying. Technical bulletin.* **USDA: Forest Service: FPL**, Madison, n. 1577, 1978.

LUXFORD. R F. *Strength of glue-laminated Sitka spruce made up of rotary-cut veneers.* **USDÁ Forest Service, FPL** Rep. 1512. *Forest Prod Lab.*, Madison, 1944.

LVL **HANDBOOK EUROPE. Federation of the Finnish Woodworking Industries**, 2019. Punamusta, Finland 2019.

MAGALHÃES, W. L. E. controle de manchadores e apodrecedores da madeira de *pínus*. II Seminário de Atualidades em Proteção Florestal. Controle de Incêndios, Pragas, Doenças e Plantas Invasoras em Áreas Florestais, 2005.

MARTINHÃO FILHO, O.; SOUZA, L. G. M. Restrições técnicas associadas a um sistema integrado de gestão: estudo de caso em uma empresa. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26., 2006. **Anais...**Fortaleza, CE, 2006.

MARTINI, Sergio. Madeira engenheirada, **Revista opiniões**, São Paulo-SP, 2013.

MATOS, J. L. M. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** 1997, 117 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MATSUNAGA, D. K. **Avaliação da utilização de madeira comercial de *Pinus taeda* L. e da adequabilidade da Norma Européia Unificada (CEN) à construção de vigas laminadas coladas.** 1995, 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MELLO, A. E. N. S. **Aplicação do mapeamento de processos e da simulação no desenvolvimento de projetos de processos produtivos**. 2008. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) –Universidade Federal de Itajubá, Itajubá 2008.

MENDOZA, Z. M. S. H.; BORGES, P. H. M.; SANTOS, E. A.; PENNA, J. E.; ELIAS, M. P. S.; MORAIS, P. H. M. **ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PAINÉIS COMPENSADOS E LAMINATED VENEER LUMBER (LVL)**. *Nativa*, v 5(7), p 588-593, 2018.

MENDOZA, Z. M. S. H; BORGES, P. H. M; RIBEIRO, A. S; FERNANDES, F. B. (2017). **Aspectos gerais sobre adesivos para madeira**. *Multitemas*, Campo Grande-MS, v. 22, n. 51, p. 49-68, 2017.

MOHAMMAD F. P.; HAMIDREZA E.; ALI D.; MOHAMMAD V. K.; MOHAMMAD H. S. *Durability-related performance of reinforced bondline by phenol formaldehyde/nano SiO₂ composite in Laminated Veneer Lumber (LVL)*. **Journal of Building Engineering**, v 60, 2022.

MÜLLER, M. T *et al*. Influência de diferentes combinações de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* em painéis LVL. **Ciência Florestal**, v. 25, p. 153-164, 2015.

MULLER, M. T. **Influência de diferentes combinações de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* em painéis estruturais LVL**, 2009. Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria-RS, 2009.

MUSTEFAGA, E. C *et al*. Caracterização físico-mecânica da madeira juvenil de *Pinus*, **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 47, n. 123, p. 472-481, 2019.

NOGUEIRA, R. S. **Proposta de um método de ensaio para controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e de LVL**. 2017. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

OLIVEIRA, J. C. Análise da qualidade de colagem de painéis de madeira compensada de *Pinus taeda* tratada com CCA. 2016. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus Experimental de Itapeva, 2016.

ÖZÇIFCI, A. *Effects of scarf joints on bending strength and modulus of elasticity to laminated veneer lumber (LVL)*. **Building and Environment**, v. 42, n. 3-12, p. 1510-1514, 2007.

PADRÃO VOLUNTÁRIO DO PRODUTO (PS1-19). Contraplacado estrutural. **Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia**. Gaithersburg, EUA, 2019.

PEINADO, J; GRAEML, A. R. Administração da produção. **Operações industriais e de serviços**. *Unicenp*, p. 201-202, 2007.

- PEDROSA, A. L. **Performance de vigas “I” constituídas por flanges de PLP e almas de compensado de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden, e alma de OSB de *Pinus spp.*** Curitiba, 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- PURBA, C.Y.C.; POT, G; VIGUIER, J. *et al.* **The influence of veneer thickness and knot proportion on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) made from secondary quality hardwood. *European Journal of Wood and Wood Products*. V 77, p 393–404, (2019).**
- RAKNES, E. Durability of structural wood adhesives after 30 years ageing. ***European Journal of Wood and Wood Products***, v. 55, n. 2-4, p. 83-90, 1997.
- RAUTE ENGINEERED WOOD. **Tecnología de LVL: vigas de chapas laminadas.** Santiago, 1980. não paginado.
- RIBEIRO, E. S.; GONÇALEZ, J. C.; SOUZA, R. S.; PAULA, M. H. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos. ***Nativa*, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 103-106, 2016.**
- RIBEIRO, J. R.; FERNANDES B. C.; ALMEIDA D. A. A questão da agregação de valor no mapeamento de processo e no mapeamento de falhas In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos.
- RITTER, M. A.; MORRELL, J. J. (1990). *Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance. Chapter 13: Bridge Inspection for Decay and Other Deterioration. United States Department of Agriculture, USDA. Forest Service. United States.*
- SANTOS, A *et al.* Rendimento efetivo em laminação de madeira de *Pinus oocarpa* cultivada no estado de minas gerais. ***Enciclopédia Biosfera***, v. 11, n. 21, 2015.
- SANTOS, A. M. L. (2008). **Avaliação teórica e experimental de vigas em “I” pré-fabricadas de madeira com flanges de painéis de lâminas paralelas (LVL) e alma de painéis de partículas orientadas (OSB) e compensado.** Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM-90/2008, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 94p.
- SANTOS, L. C. **Síntese e caracterização de adesivos lignina-fenol-formaldeído para madeira e derivados.** 2016. 43f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.
- SANTOS, S. S.; MORAES, P. D.; TEREZO, R. F. **Fabricação de chapas de laminated veneer lumber (LVL) com madeira de pinus.** 4º Congresso luso-brasileiro de materiais de construção sustentáveis, p 269–281, 2022.
- SANTOS, S. S.; MORAES, P. D.; TEREZO, R. F. **Patologias adquiridas na fabricação de painéis de madeira em laminated veneer lumber (LVL).** 5º Congresso brasileiro de ciência e tecnologia da madeira, Anais do evento, 2022.

SCHAFFER, E.L. *et al.* *FPL Press-Lam process: Fast, efficient conversion of logs into structural products*. *For. Prod. J.*, Madison, v.22, n. 11, p. 11-18, 1972.

SCHAFFER, E.L. *et al.* Feasibility of producing a high-yield laminated structural product: General summary. U.S. Forest Products Laboratory. Research Paper, FPL-175, 1972a. 20p.

SELLERS, T. ***Plywood and adhesive technology***. New York: Marcel Dekker, 1985. 661 p.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, 2017.

SHARAPOV E.; BRISCHKE C.; BICKE S. *et al.* *Evaluation of white rot decay in phenol-formaldehyde resin treated European beech (Fagus sylvatica L.) LVL by drilling resistance measurements*. **European Journal of Wood and Wood Products**. v 80, p 439–449, 2022.

SHIMIZU, J., & SEBBENN, A. (2008). Espécies de Pinus na silvicultura brasileira. *Pinus na silvicultura brasileira*. Colombo: Embrapa Florestas, 49-74.

SHINGO, Shigeo. Sistema de Toyota de Produção. Porto Alegre: Bookman, 1996

SILVA, J.C. Madeira preservada – Os impactos ambientais. **Revista da Madeira**. Viçosa: UFV. 100 ed. 2006.

SILVA, P. M.; SARTONI, M. M. A utilização prática do PDCA e das ferramentas da qualidade como provedoras intrínsecas à melhoria continua nos processos produtivos em uma indústria têxtil. **Revista Organização Sistêmica**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 39–55, 2014.

SIQUEIRA, J. P. D. **Os conflitos institucionais da gestão florestal no Brasil - um benchmarking entre os principais produtores florestais internacionais**. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SOLA, M. B. M. S. **Caracterização físico-mecânica de painéis OSB produzidos com lascas de madeira tratadas com CCA**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Câmpus de Itapeva, 2017.

SOUZA, R. V.; DEMENIGHI, A. L. Tratamentos preservantes naturais de madeiras de floresta plantada para a construção civil. **Mix Sustentável**, v. 3, n. 1, p. 84-92, 2017.

SOZO, P. *et al.* **Avaliação do rendimento na laminação de *Pinus patula schldl. & cham.* em torno desfolhador com garras**. III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira – CBCTEM, Florianópolis, 2017.

SUCHSLAND, O. *Warping of furniture panels. Extension Bulletin E-745. Agric. Exp. Station.* Michigan, 1972.

SZÜCS, C. A. *et al. Estruturas de madeira.* UFSC, Florianópolis, vol 3, 2015.

TAMMELA, I. *Laminated venner lumber (LVL) manufacturing.* In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1., 1998, Belo Horizonte. Anais... Viçosa: SIF/UFV/DEF, 1998. p. 162-168.

TANRITANIR, E.; HIZIROGLU, S.; AS, N. *Effects of steaming time on surface roughness of beech veneer. Building and Environment*, v. 41, n. 11–12, p. 1494-1497, 2006.

TENORIO C.; MOYA R.; MUÑOZ F. *Comparative study on physical and mechanical properties of laminated veneer lumber and plywood panels made of wood from fast-growing Gmelina arborea trees. Journal of Wood Science*, 57, p 134–139, 2011.

TIMPONI, R. R. **Análise do processo de manutenção para estruturas em Madeira Laminada Colada: Estudo de caso em Brasília.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Engenharia Civil do Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, Brasília-DF.

TOMASELLI, I. Secagem das lâminas para indústria de painéis. **Madeira / Móveis.** Bento Gonçalves, v. 1, n. 1, p. 27-33, 1983.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood Handbook: wood as engineering material.** USDA: Washington, 1999. 473p.
souzasouza VLOSKY, R.P. *et al. Laminated veneer lumber: A United States market overview. Wood and Fiber Science.* Madison, v.26,n.4, p. 456-466, 1994.

VIVIAN, M. A.; DOBNER JÚNIOR, M; MODES, K. S.; BELINI, U. L.; VAZ, D. R. Ciclos de produção de Pinus taeda L. com mais de 30 anos: uma alternativa para obtenção de madeira para usos sólidos e estruturais. **Ciência Florestal.** Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 573-596, 2022.

VIVIAN, M. A. *et al. Qualidade das madeiras de Pinus taeda e Pinus sylvestris para a produção de polpa celulósica kraft.* Scientia Forestalis, v. 43, n. 105, p. 183-191, 2015. Disponível em:
<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr105/cap18.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2023.

VIVIAN, M. A.; GROSSKOPF, É. J.; NUNES, G. C.; ITAKO, A. T.; MODES, K. S. Qualidade e eficiência de produtos naturais no tratamento preservativo das madeiras de Araucaria angustifolia, *Eucalyptus viminalis* e *Pinus taeda*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 19, n. 1, p. 35-47, 2020. Disponível em:
<https://www.revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/14720>. Acesso em: 16Fev.2023.

- WANG, J.; CAO, X.; LIU, H. Uma revisão dos efeitos de longo prazo da umidade nas propriedades mecânicas da madeira e de produtos à base de madeira. *EUR. J. Wood Prod.* 79, 245–259, 2021.
- WEI, Y; RAO, F; YU, Y *et al.* Fabrication and performance evaluation of a novel laminated veneer lumber (LVL) made from hybrid poplar. *European Journal of Wood and Wood Products.* v 77, p 381–391, 2019.
- YOUNGQUIST, J. A.; LAUFENBERG, T. L.; BRYANT, B. S. End jointing of laminated veneer lumber for structural use. *Forest Products Journal*, v. 34, n. 11-12, p. 25-32, 1984.
- ZEUG, W; BEZAMA, A; THRÄN, D. Application of holistic and integrated LCSEA: Case study on laminated veneer lumber production in Central Germany. *The International Journal of Life Cycle Assessment.* v 27, p 1352–1375, 2022.

APÊNDICE A – FORMULÁRIO APLICADO *IN LOCO*

(continua)

Formulário		
Autor:		
Data:	Local:	
Email:		
Responsável técnico:		
Email:		
Contato:		
Normas adotadas pela empresa:		
Normas que queiram implementar:		
Fluxo de Produção do _____:		
MATÉRIA PRIMA E PRODUTOS UTILIZADOS		
1 - Tipo de matéria prima utilizada	() <i>Pinus taeda</i> () <i>Pinus elliotti</i> Outro:	
Obs:		
2- Idade do material utilizado	() Menor que 7 () 7 a 12 anos () 12 a 18 anos () Mais de 18	
Obs:		
3- Armazenamento da matéria-prima	Condições:	
Obs:		
4- Adesivo utilizado	Tipo: Aditivo polimerizante: Teor de sólidos:	
Obs:		
PRÉ-LAMINAÇÃO (COZIMENTO)		
5- Cozimento dos troncos	Tempo:	Temperatura:
Obs:		
LAMINAÇÃO		
6- Ter de umidade das lâmina	() -6% () Entre 6 e 12% () Entre 12 e 15% () + 15%	
Obs:		
7- Posicionamento das lâminas	() Vertical () Horizontal () Os dois	
Obs:		
SECAGEM		
8- Secagem:	Tipos utilizado: Vapor: () SIM () NÃO Tempo de secagem: Umidade de equilíbrio de condicionamento:	
Obs:		
CLASSIFICAÇÃO E MONTAGEM		
9- Classificação das Lâminas	() Sim () Não Método:	
Obs:		
10- Misturas de lâminas	() Sim () Não Casos:	
Obs:		
11- Preparação de lâminas para a colagem	() Sim () Não Tipo:	
Obs:		

APÊNDICE A – FORMULÁRIO DE APLICAÇÃO IN LOCO

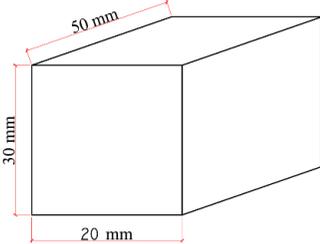
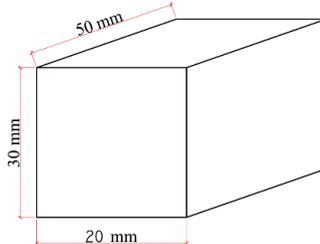
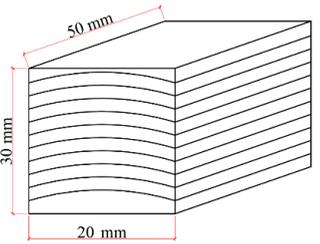
(conclusão)

COLAGEM E PRENSAGEM			
12- Aplicação da cola	Método: Temperatura da cola: Gramatura:		
Obs:			
13- Pré-prensagem	() Sim () Não		
Obs:			
14- Tipo de prensa	() radio frequência	() prensa a frio	() prensa com calor
Obs:			
15- Pressão da colagem utilizada	Valor (MPa):		
Obs:			
16- Tempo de prensa e espessura média da linha de cola	Minutos:		Milímetros:
Obs:			
17- Temperatura e umidade (ambiente controlado-armazenagem)	() Sim () Não		
Obs:			
18- Condicionamento dos painéis (sala climatizada/temperatura controlada/...)	Tempo:		Método:
Obs:			
CORTE E PRODUTO			
16-Cortes de Peça	Dimensões de cortes para o produto: Aproveitamento / painel: Tipo de serra (fita/esquadrejadeira/...): Recalque de dente: Avanço da serra: Plaina: () SIM () NÃO Se sim, quantos eixos?: Lixadeira: () SIM () NÃO Se sim, tipo: Granulometria:		
Obs:			
EMENDAS			
19- Emenda de peças	Tipo:	Colagem: () Sim () Não Fixação:	
Obs:			
INSPEÇÃO E REVISÃO			
20-Inspeção do produto	Tipo: Classificação final: () Sim () Não Quais:		
Obs:			
ESPECIFICAÇÕES DO MATERIAL E COMPONENTES PARA PRODUÇÃO			
20- Tratamento preservante	Qual:	Tipo de Aplicação: Quantos kg/m ³	
Obs:			
21- Controle de umidade no processo	() Sim () Não Quantidade:		
Obs:			

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

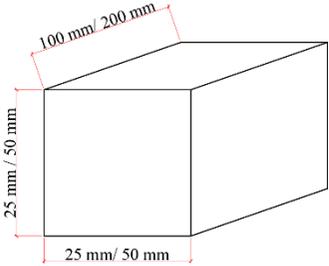
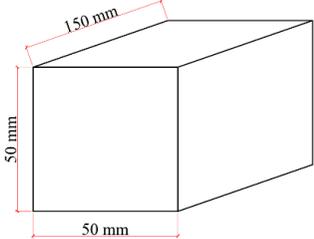
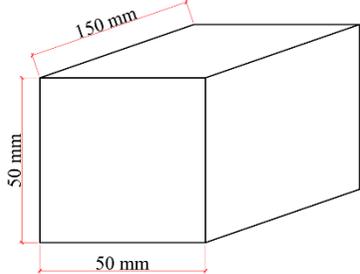
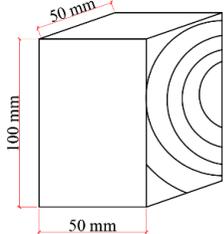
APÊNDICE B - QUADRO DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

(continua)

Ensaio de caracterização da madeira						
ENSAIO	ASTM (D4442-92; D2395-14; D143-21)		ABNT NBR 7190:1997		EN 384-2004	
	Corpo-de-Prova	Quantidade	Corpo-de-Prova	Quantidade	Corpo-de-Prova	Quantidade
Umidade	Os corpos de prova devem ser totalmente representativos do material de onde são retirados. O tamanho da amostra deve ser tal que medições precisas de massa e volume sejam fáceis de obter.	8		6/12	Não apresenta	40
Densidade	Os corpos de prova devem ser totalmente representativos do material de onde são retirados. O tamanho da amostra deve ser tal que medições precisas de massa e volume sejam fáceis de obter.	Não apresenta		6/12	Não apresenta	40
Estabilidade dimensional	Os corpos de prova devem ser totalmente representativos do material de onde são retirados. O tamanho da amostra deve ser tal que medições precisas de massa e volume sejam fáceis de obter.	Não apresenta		6/12	Não apresenta	40

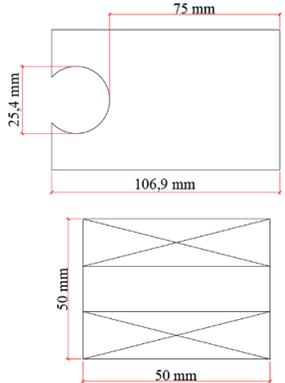
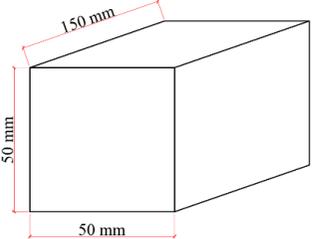
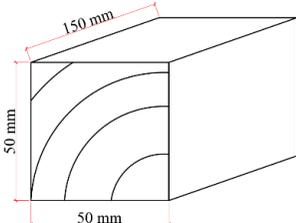
APÊNDICE B – QUADRO DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

(continuação)

Ensaio de caracterização da madeira						
ENSAIO	ASTM (D4442-92; D2395-14; D143-21)		ABNT NBR 7190:1997		EN 384-2004	
	Corpo-de-Prova	Quantidade	Corpo-de-Prova	Quantidade	Corpo-de-Prova	Quantidade
Compressão paralela às fibras		Não apresenta		6/12	Não apresenta	40
Compressão normal às fibras		Não apresenta		6/12	Não apresenta	40

APÊNDICE B – QUADRO DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

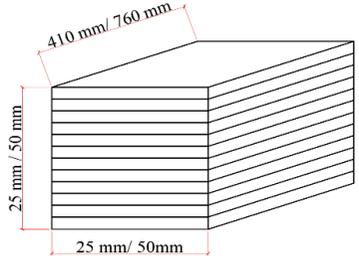
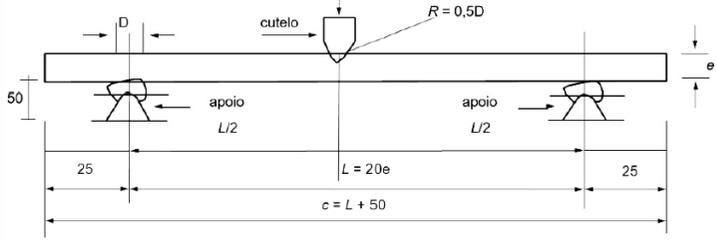
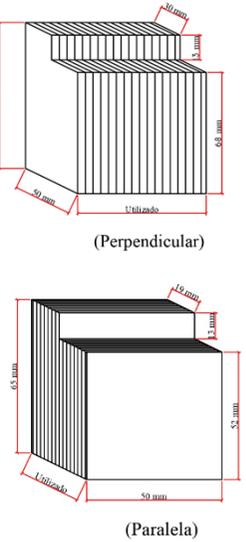
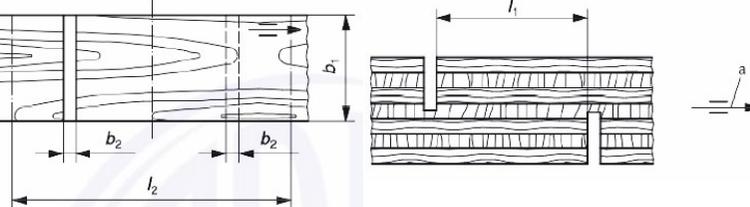
(conclusão)

Ensaio de caracterização da madeira						
ENSAIO	ASTM (D4442-92; D2395-14; D143-21)		ABNT NBR 7190:1997		EN 384-2004	
	Corpo-de-Prova	Quantidade	Corpo-de-Prova	Quantidade	Corpo-de-Prova	Quantidade
Fendilhamento	Não apresenta	Não apresenta		6/12	Não apresenta	Não apresenta
Dureza		Não apresenta		6/12	Não apresenta	Não apresenta

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

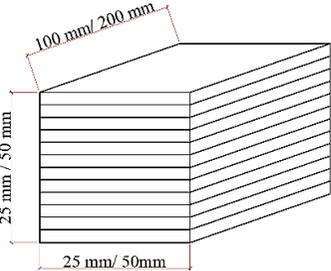
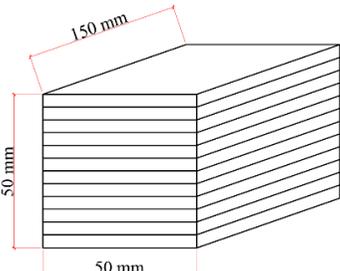
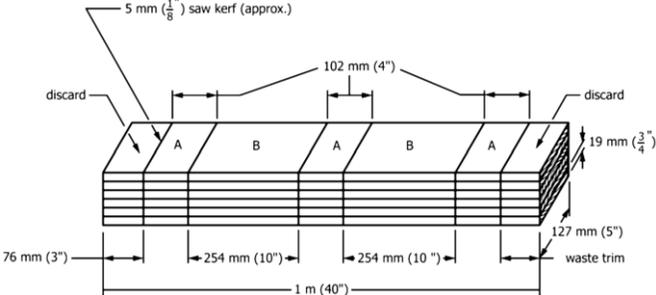
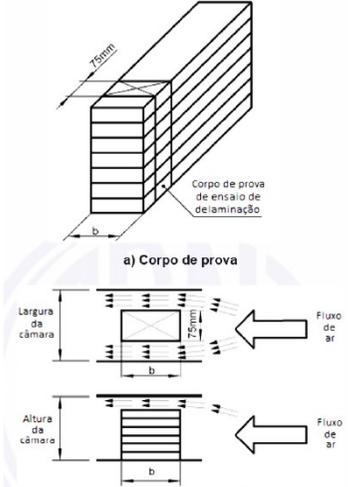
APÊNDICE C – QUADRO DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO LVL

(continua)

Ensaio de caracterização de elementos de LVL				
ENSAIO	ASTM (D143-2021; D5456-2021; D4688M-2014; D2559-2016)	Quantidade	ABNT NBR (7190:1997 e 2022-6; 17002:2021; ISO 12466-1:2012)	
	Corpo-de-prova		Corpo-de-prova	Quantidade
Flexão estática		3	 <p>Vão entre os apoios = a 20 vezes a espessura nominal de cada CP.</p>	6
Cisalhamento da linha de cola		Não apresenta	 <p> $b^1 = (25 \pm 0,5)$ mm – largura da área de cisalhamento (largura do CP) $b^2 = (25 \text{ mm a } 4 \text{ mm})$ – largura dos cortes de serra $l^1 = (25 \pm 0,5)$ mm – comprimento da área de cisalhamento $l^2 = 50$ mm – distância mínima entre as garras espessura = espessura do painel </p>	10 para cada linha testada

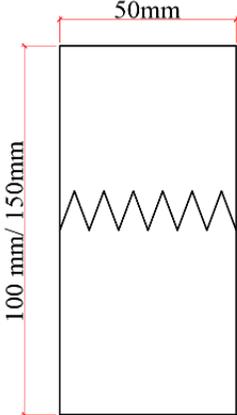
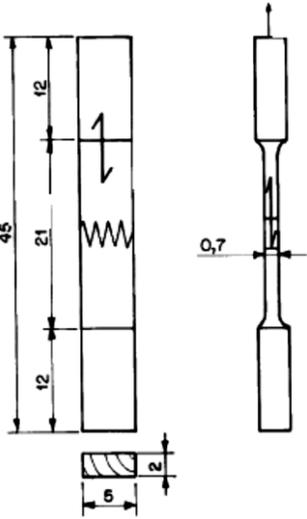
APÊNDICE C – QUADRO DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO LVL

(continuação)

Ensaio de caracterização de elementos DE LVL				
ENSAIO	ASTM (D143-2021; D5456-2021; D4688M-2014; D2559-2016)		ABNT NBR (7190:1997 e 2022-6; 17002:2021; ISO 12466-1:2012)	
	Corpo-de-prova	Quantidade	Corpo-de-prova	Quantidade
Compressão paralela às fibras		Não apresenta		6/12
Delaminação		3 Peças 6 B 1 B divide em 3 B 18 CPs		6/12

APÊNDICE C – QUADRO DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO LVL

(conclusão)

Ensaio de caracterização de elementos de LVL				
ENSAIO	ASTM (D143-2021; D5456-2021; D4688M-2014; D2559-2016)		ABNT NBR (7190:1997 e 2022-6; 17002:2021; ISO 12466-1:2012)	
	Corpo-de-prova	Quantidade	Corpo-de-prova	Quantidade
Tração nas emendas dentadas		20		6/12

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

APÊNDICE D – TABELA DOS DADOS AVALIADOS NO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA (MOE E MOR)

Corpos de prova	Carga máxima (N)	Base (mm)	Altura (mm)	Carga 50%	Carga 10%	Deformação 50%	Deformação 10%	MOE (MPa)	MOR (MPa)
1	5350,2	38,49	51,65	2675,1	535,02	6,0723	1,2581	7188	55
2	5413,4	38,03	51,49	2706,7	541,34	6,5076	1,2588	6814	56
3	5514,4	37,97	52,06	2757,2	551,44	6,4669	1,2694	6793	56
4	3618,1	38,24	52,1	1809,05	361,81	4,365	0,81202	6459	37
5	5871	38,5	51,78	2935,5	587,1	6,6724	1,2365	6931	60
6	4585,5	38,11	51,65	2292,75	458,55	5,8166	1,1288	6389	47
7	5348,1	38,04	51,12	2674,05	534,81	6,2103	1,2585	7290	56
8	5570	38,44	51,13	2785	557	6,0645	1,186	7622	58
9	4229,6	37,85	51,37	2114,8	422,96	5,3587	1,043	6552	44
MÉDIA	5055	38	51	2527	505	5,94	1,16	6893	52
DESVIO PADRÃO	742	0,24	0,35	371	74	0,71	0,15	411	8
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	14	0,63	0,69	14	14	12	13	6	15

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

**APÊNDICE E – TABELA DOS DADOS AVALIADOS NO ENSAIO
DE RESITÊNCIA AO CISALHAMENTO DA LINHA DE COLA**

Corpos de Prova	Linha de cola superior	Linha de cola central	Linha de cola inferior
1	2,92	3,17	2,17
2	3,75	2,58	3,19
3	3,78	2,63	3,34
4	2,13	3,98	2,84
5	3,11	2,29	2,69
6	2,30	3,50	3,15
7	2,90	3,93	2,28
8	3,00	4,42	3,50
9	3,22	2,92	2,02
10	2,68	3,50	3,25
11	3,08	2,31	2,42
12	2,50	3,08	2,77
13	2,55	2,21	3,03
14	2,46	3,21	3,16
15	3,27	3,21	-
16	2,50	3,63	-
17	2,50	4,13	-
18	2,01	3,29	-
19	3,25	4,23	-
MÉDIA	2,8	3,3	2,8
DESVIO PADRÃO	0,5	0,7	0,5
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO(%)	18	21	16

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

APÊNDICE F – EQUAÇÕES PARA TRATAMENTO DOS DADOS RESULTANTES NOS RESPECTIVOS ENSAIOS (ABNT NBR 7190, 2022; ABNT NBR 17002, 2021; ABNT NBR 12466-1, 2012)

Determinação do teor de umidade

Foi considerado a massa inicial (m_i) do corpo-de-prova com exatidão de 0,01g, e a massa seca (m_s). Com estes resultados foi possível obter o teor de umidade, aplicados nos valores na Equação 1 abaixo:

$$U (\%) = ((m_i - m_s) / m_s) \times 100,$$

onde:

m_i = Massa inicial da madeira, em g;

m_s = Massa da madeira seca, em g.

(1)

Determinação da densidade básica

Para o ensaio de densidade aparente foi realizada a pesagem dos corpos de prova (CPs) para determinar as massas das amostras pós-equilíbrio de umidade em 12% na câmara de climatização. Posteriormente, os CPs foram medidos nas direções tangencial, radial e longitudinal utilizando um paquímetro com precisão de 0,1 mm para a determinação da variação dimensional em metros cúbicos. A densidade básica trata-se de uma massa específica convencional definida pela razão entre a massa seca e o seu volume saturado, dada pela equação 2:

$$\rho_{bas} = m_s / V_{sat},$$

onde:

m_s = Massa seca da madeira, em kg;

V_{sat} = Volume da madeira saturada, em m³.

(2)

Determinação da estabilidade dimensional

O direcionamento para análise da estabilidade dimensional da madeira consistiu na determinação da deformação referente a retração (R_t), ao inchamento (I_m) em função das respectivas dimensões da madeira saturada e seca, calculadas através das seguintes equações 3 e 4:

Retração (Rt)	Inchamento (Im)
$\begin{aligned} \text{Rt, 1} &= ((L^1, \text{sat} - L^1, \text{Seco}) / L^1, \text{sat}) \times 100 \\ \text{Rt, 2} &= ((L^2, \text{sat} - L^2, \text{Seco}) / L^2, \text{sat}) \times 100 \\ \text{Rt, 3} &= ((L^1, \text{sat} - L^1, \text{Seco}) / L^1, \text{sat}) \times 100 \end{aligned} \quad (3)$	$\begin{aligned} \text{Im, 1} &= ((L^1, \text{sat} - L^1, \text{Seco}) / L^1, \text{seca}) \times 100 \\ \text{Im, 2} &= ((L^2, \text{sat} - L^2, \text{Seco}) / L^2, \text{seca}) \times 100 \\ \text{Im, 3} &= ((L^1, \text{sat} - L^1, \text{Seco}) / L^1, \text{seca}) \times 100 \end{aligned} \quad (4)$

Determinação da compressão paralela e perpendicular às fibras

A resistência a compressão paralela às fibras (f_{c0}), é dada pela tensão máxima de compressão aplicada em um corpo-de-prova, expressada em MPa, obtidas a partir da Equação 6:

$$f_{c0} = f_{c0, \text{max}} / A,$$

Onde:

$f_{c0, \text{max}}$: consiste na máxima força de compressão aplicada ao CP durante o ensaio, expressa em Newtons (N) (6)
 A: é a área inicial da seção transversal comprimida, em mm²;
 f_{c0} : é a resistência à compressão paralela as fibras, em MPa.

Para a definição do MOE é determinado por meio da reta secante à curva de tensão e deformação, através dos pontos ($\sigma_{10\%}$; $\varepsilon_{10\%}$) e ($\sigma_{50\%}$; $\varepsilon_{50\%}$), que tratam respectivamente a 10% e 50% da resistência à compressão paralela às fibras, resultantes do teste realizado na máquina de ensaio e calculado por meio da equação 7:

$$E_{c0} = \sigma_{50\%} - \sigma_{10\%} / \varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%},$$

onde:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$: São as tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência f_{c0} , representadas pelos pontos 31 e 45 do diagrama de carregamento conforme a figura 12. (7)
 $\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$: São as deformações medidas no CP alongado, correspondentes às tensões.

Determinação de dureza Janka

Para o ensaio de dureza janka, a determinação consiste na tensão que atua em uma das faces do corpo de prova prismático no momento da penetração do equipamento, sendo calculado por meio da equação 8:

$f_H = F_{max} / A_{seção\ diametral}$,

onde:

F_{max} : é a máxima força aplicada na amostra na profundidade igual ao seu raio, expressa em Newtons (N) (8)

Aseção diametral: é a área da seção diametral da esfera, igual a 1 cm^2 (100 mm^2)

Determinação da flexão estática (edgewise)

Para o ensaio de flexão estática (f_M) é dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo-de-prova no ensaio de caracterização simples, determinado pela hipótese da madeira ser um material elástico, calculada pela seguinte equação:

$f_M = M_{max} / W_e$,

onde:

M_{max} : trata-se do máximo momento aplicado ao corpo de prova, em N.mm; (9)

W_e : consiste no módulo de resistência elástica da seção transversal do CP, dado por $bh^2/6$ mm^3 .

Para a definição do MOE e MOR determina-se através da inclinação da reta secante à curva de tensão e deformação, sobre os pontos ($\sigma_{10\%}$; $\varepsilon_{10\%}$) e ($\sigma_{50\%}$; $\varepsilon_{50\%}$), que tratam respectivamente a 10% e 50% da força máxima de ensaio, estimado por meio de um CP gêmeo, resultantes no teste realizado na máquina de ensaio e calculado por meio da equação 10.

$E_{m0} = (\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}) L^3 / (\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}) 4bh^3$

onde:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$: São forças correspondentes a 10% e 50% da força máxima estimada, aplicada ao CP, expressas em Newtons (N), representadas pelos pontos 31 e 45 do diagrama de carregamento ilustrado na figura 12; (10)

$\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$: São os deslocados no meio do vão correspondente a 10% e 50% da força máxima estimada $f_{m,est}$, em mm;

b: corresponde à largura da seção transversal do CP em mm;

h: corresponde à altura da seção transversal do CP em mm.

Determinação do cisalhamento da linha de cola

O cálculo utilizado para obtenção da força de cisalhamento (t) de cada corpo-de-prova em MPa é utilizado da seguinte equação 11:

$$T = F / lb,$$

onde:

F: consiste na força (carga) no momento da ruptura do CP, em N; (11)
 l: o comprimento da área sujeita ao cisalhamento, em mm;
 b: a largura da área sujeita ao cisalhamento, em mm.

Determinação da tração

A obtenção dos valores da resistência estimada para a resistência à tração às fibras (f_{t0}), são resultantes através da máxima tensão possível de atuar em um corpo-de-prova de característica alongado com um trecho central de seção transversal uniforme de área A e comprimento não menor que $8\sqrt{A}$, com extremidades mais resistentes que o trecho central e com concordâncias que assegure uma ruptura na região de teste, calculada por meio da seguinte equação:

$$f_{t0} = f_{t0,max}/A,$$

onde:

$f_{t0, max}$: consiste na máxima força de tração aplicada ao CP durante o ensaio, em N; (12)
 A: é a área inicial da seção transversal tracionada do trecho central do CP, em mm²;
 f_{c0} : é a resistência à tração paralela às fibras, em MPa.

Determinação do fendilhamento

A resistência ao fendilhamento paralelo às fibras da madeira (f_{s0}) é dada pela máxima tensão que pode atuar no corpo de prova de madeira, calculado conforme a equação 13

$$f_{s0} = f_{s0,max}/A_{s0},$$

onde:

$f_{s0,max}$: é máxima força aplicada ao corpo de prova, em N; (13)
 A_{s0}: é a área crítica da seção transversal do corpo de prova, resistente ao fendilhamento, em mm².