



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

Mario Antonio Pinto da Silva Junior

**Avaliação de emendas dentadas verticais em vigas de *laminated veneer
lumber (LVL)***

Florianópolis

2023

Mario Antonio Pinto da Silva Junior

**Avaliação de emendas dentadas verticais em vigas de *laminated veneer lumber*
(LVL)**

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 Estruturas.
Orientadora: Prof^a. Poliana Dias de Moraes, Dra.

Florianópolis

2023

Silva Junior, Mario Antonio Pinto

Avaliação de emendas dentadas em vigas de laminated veneer lumber (LVL) / Mario Antonio Pinto Silva Junior ; orientador, Poliana Dias Moraes, 2023.

69 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. laminated veneer lumber. 3. emendas dentadas. 4. estruturas de madeira. 5. madeira engenheirada. I. Moraes, Poliana Dias. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Mario Antonio Pinto da Silva Junior

Avaliação de emendas dentadas em vigas de *laminated veneer lumber* (LVL)

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 07 de agosto de 2023,
pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

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

Prof. Sandro Fábio César, Dr.
Universidade Federal da Bahia

Prof. Tiago Morkis Siqueira, Dr.
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^ª. Poliana Dias de Moraes, Dra.
Orientadora

Florianópolis, 2023.

“Nunca ande por trilhas, pois assim só irá até onde outros já foram.”

Alexander Graham Bell

AGRADECIMENTOS

Gostaria de registrar aqui meu agradecimento a Deus, por permitir dar mais um passo em minha formação.

Agradecer à minha família, Gelusa Silva (mãe), Mario Silva (pai), Richard Silva (irmão) e Daniela Mailahn (namorada), por estarem sempre ao meu lado, apoiando incondicionalmente.

À Prof. Poliana Dias de Moraes, meus sinceros agradecimentos pela ajuda, ensinamentos e orientação ao longo de todo mestrado.

A todos os colegas e aos demais professores do Departamento de Engenharia Civil da UFSC agradeço por todo apoio, amizades e contribuições para a minha formação, em especial os amigos Alexandre Oliveira Vitor, Ana Carolina Viana, Auro Cândido Marcolan Jr, Guilherme Gomes, Sabrina Kalise Heinen e Samuel Santos.

Aos amigos e colegas da URBEM S.A., em especial ao departamento de engenharia, agradeço por todo apoio e incentivo para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos professores das bancas de defesa e de qualificação realizadas, pela disponibilidade, atenção e contribuições com este trabalho.

Muito obrigado!

RESUMO

A fabricação de produtos engenheirados de madeira vem ganhando força nas últimas duas décadas, à medida que as edificações que empregam estes materiais ficam maiores e mais robustas. O *laminated veneer lumber* (LVL) é um dos produtos de madeira engenheirada mais versáteis sendo empregado desde estruturas de grandes vãos a formas orgânicas de arquitetura paramétrica. No Brasil, o painel LVL é produzido com lâminas de madeira que formam as chapas madre do produto, sendo necessária a utilização de emendas para proporcionar elementos estruturais (como vigas e pilares) de maiores dimensões. Emendas são consideradas pontos fracos em elementos estruturais e seu uso deve ser avaliado cuidadosamente na fabricação destes elementos. O presente estudo tem como objetivo avaliar, experimentalmente, o comportamento na flexão a quatro pontos de vigas em LVL, com a presença de emendas dentadas e propor melhorias quanto à proporção e ao transpasse das emendas dentadas em elementos de LVL. Foram avaliadas 2 tipologias de vigas de LVL formadas pela justaposição de duas e de três chapas madres, sem e com a presença de emendas. As emendas foram posicionadas ao centro do vão, transpassadas em 200 mm e 600 mm. Observou-se que o modo de falha das vigas com emendas, à medida que a distância entre emendas diminui, é caracterizado pela falha na base da emenda, com indícios de ruptura frágil. Entretanto, o maior espaçamento entre emendas proporcionou uma trinca horizontal no comprimento entre emendas, ocasionando uma maior distribuição de tensões no comprimento da viga. Os valores médios do MOE para os tratamentos controles das vigas duplas (V2) e triplas (V3) de LVL, sem emendas dentadas, foram de 6760 MPa e 5960 MPa, respectivamente. Já para módulo de ruptura, os tratamentos controles dos grupos V2 e V3, os valores foram de 6760 MPa e 5960 MPa, respectivamente. As reduções do MOE dos tratamentos V2-M, V2-200, V2-600, em relação ao tratamento controle V2-C foram de 26,85%, 19,62%, 7,91%, respectivamente, enquanto para as vigas V3-M, V3-200 e V3-600, em relação ao tratamento V3-C, as reduções foram de 19,65%, 17,15%, 1,2%, respectivamente. Já as reduções do MOR dos tratamentos V2-M, V2-200, V2-600, V3-M e V3-200 em relação aos tratamentos controle V2-C e V3-C foram de 23,4%, 19,8%, 10,7%, 14,4%, 9,4%, respectivamente. Com exceção do tratamento V3-600, que apresentou um acréscimo no MOR de 1,3% em relação ao controle. Conforme a sobreposição entre emendas dentadas aumenta, os valores para o módulo de elasticidade se tornam maiores. Para vigas formadas por três chapas de LVL sem emendas e com emendas transpassadas a 600 mm, não houve diferença estatisticamente significativa.

Palavras-chave: laminated veneer lumber; emendas dentadas; estruturas de madeira; madeira engenheirada; flexão a quatro pontos.

ABSTRACT

The manufacture of engineered wood products has been gaining momentum over the last two decades, as buildings using these materials become larger and more robust. Laminated veneer lumber (LVL) is one of the most versatile engineered wood products, being used in structures with large spans and organic forms of parametric architecture. In Brazil, the LVL panel is produced with wooden sheets that form the product's motherboards, requiring the use of splices to provide larger structural elements (such as beams and pillars). Splices are considered weak points in structural elements and their use must be carefully evaluated in the manufacture of these elements. The present study aims to experimentally evaluate the four-point bending behavior of LVL beams, with the presence of toothed splices, and to propose improvements regarding the proportion and overlap of toothed splices in LVL elements. Two types of LVL beams were evaluated, formed by the juxtaposition of two and three mother plates, without and with the presence of seams. The seams were positioned in the center of the span, crossed by 200 mm and 600 mm. It was observed that the failure mode of beams with splices, as the distance between splices decreases, is characterized by failure at the base of the splice, with signs of brittle failure. However, the greater spacing between splices provided a horizontal crack in the length between splices, causing a greater distribution of stresses along the length of the beam. The average MOE values for the control treatments of double (V2) and triple (V3) LVL beams, without toothed splices, were 6760 MPa and 5960 MPa, respectively. As for the modulus of rupture, the control treatments of groups V2 and V3, the values were 6760 MPa and 5960 MPa, respectively. The MOE reductions of treatments V2-M, V2-200, V2-600, in relation to the control treatment V2-C were 26.85%, 19.62%, 7.91%, respectively, while for beams V3 -M, V3-200 and V3-600, in relation to V3-C treatment, the reductions were 19.65%, 17.15%, 1.2%, respectively. The MOR reductions of treatments V2-M, V2-200, V2-600, V3-M and V3-200 in relation to control treatments V2-C and V3-C were 23.4%, 19.8%, 10.7%, 14.4%, 9.4%, respectively. With the exception of treatment V3-600, which showed an increase in MOR of 1.3% compared to the control. As the overlap between toothed splices increases, the values for the modulus of elasticity become larger. For beams formed by three LVL sheets without seams and with seams crossed at 600 mm, there was no statistically significant difference.

Keywords: *laminated veneer lumber; finger joint; timber structures; engineered wood; four point flexion.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Viga em LVL com emenda dentada.	15
Figura 2 – Cadeia produtiva do LVL.	19
Figura 3 – <i>Laminated Veneer Lumber</i> (LVL).	20
Figura 4 – Emendas biselada e dentada.	23
Figura 5 – Orientações de emendas dentadas nas peças de madeira.	24
Figura 6 – Parâmetros que compõem a emenda dentada	25
Figura 7 – Microscopia dos planos anatômicos da espécie <i>Pinos elliottii</i>	27
Figura 8 – Detalhe de elementos de emenda dentada.	31
Figura 9 – Pressões de colagem, segunda EN 15497.	34
Figura 10 – Distância mínima entre emendas dentadas e nós EN 15497.	35
Figura 11 – Vigas retangular vertical e horizontal em LVL.	36
Figura 12 – Emenda dentada em chapa madre de LVL.	37
Figura 13 – Seção transversal das vigas e posicionamento das emendas dentadas (vista superior).	41
Figura 14 – Usinagem e colagem das emendas dentadas nos painéis LVL.	42
Figura 15 – Ensaio de flexão a quatro pontos nas amostras de LVL com emendas dentadas.	43
Figura 16 – Modos de falhas no ensaio de flexão estática.	44
Figura 17 – Curvas força × deslocamento das amostras do grupo V2. Erro! Indicador não definido.	
Figura 18 – Curvas força × deslocamento das amostras do grupo V3.	48
Figura 19 – Modos de falhas para o grupo V2.	49
Figura 20 – Modos de falhas para o grupo V3.	50
Figura 22 - Gráfico de caixa para o teste de Shapiro-Wilk do MOE.	52
Figura 21 – Tendência de MOE médio dos tratamentos dos grupos V2 e V3.	54
Figura 24 - Gráfico de caixa para o teste de Shapiro-Wilk do MOR.	55
Figura 23 - Tendência do MOR médio dos tratamentos dos grupos V2 e V3.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa específica aparente para os tratamentos.	46
Tabela 2 – Classificação e distribuição dos modos de falhas das vigas de LVL.	51
Tabela 3 – Valores do módulo de elasticidade obtidos para os grupos V2 e V3.	52
Tabela 4 - Valores do módulo de ruptura e carga máxima obtidos para os grupos V2 e V3...	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros normativos para emenda dentada.	32
Quadro 2 – Parâmetros para flexão a quatro pontos.	37
Quadro 3 – Dados de propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Pinus taeda</i>	39
Quadro 4 – Plano experimental proposto.	40
Quadro 5 – Parâmetros para emenda dentada - Ekomposit	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EN – *European Standard*

DIN – *Deutsches Institut für Normung*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

NBR – Norma brasileira

α – Ângulo de inclinação de dente

a – Distância entre ponto de aplicação de carga e o apoio mais próximo

b_t – Espessura da ponta de dente

b – Base da seção transversal da peça (mm)

E – Módulo de elasticidade (MPa)

E_m – Módulo de elasticidade médio (MPa)

e – Espaçamento entre a ponta de dente e a base do dente da outra superfície

F – Força (N)

f – Ruptura (MPa)

h – Altura da seção transversal da peça (mm)

I – Segundo momento de inércia (mm⁴)

L – Comprimento teórico da peça (mm)

l – Vão entre os apoios

l_f – Comprimento de dente

l_1 – Distância entre pontos de aplicação de carga

m_{12} – Massa da amostra a 12%

m_0 – Massa da amostra seca em estufa

p – Passo de dente

ρ_{12} – Densidade aparente a 12%

V_{12} – Volume da amostra a 12%

W – Módulo resistente da seção (mm³)

w – Deformação (mm)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	OBJETIVOS.....	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1.	A MADEIRA	17
2.2.	LAMINATED VENEER LUMBER (LVL)	17
2.2.1.	Propriedades físico-mecânicas do LVL.....	20
2.3.	EMENDAS DENTADAS	22
2.3.1.	Fatores de influência na produção de emendas dentadas.....	26
2.3.1.1.	<i>Densidade, porosidade e teor de umidade</i>	<i>26</i>
2.3.1.2.	<i>Adesivos.....</i>	<i>28</i>
2.3.1.3.	<i>Qualidade da superfície de colagem</i>	<i>29</i>
2.3.1.4.	<i>Pressão de colagem e tempo de cura</i>	<i>29</i>
2.3.1.5.	<i>Geometria da emenda dentada.....</i>	<i>30</i>
2.3.2.	Normativas para emendas dentadas estruturais	31
2.3.2.1.	<i>Tempo e pressão de colagem.....</i>	<i>33</i>
2.3.2.2.	<i>Geometria de dente</i>	<i>35</i>
2.4.	VIGAS EM LVL	36
2.4.1.	Fabricação	36
2.4.2.	Normativas para avaliação mecânica de vigas em LVL	37
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1.	MATERIAIS	39
3.2.	AMOSTRAS	40
3.3.	CORPOS DE PROVA.....	40
3.4.	ENSAIO DE FLEXÃO A QUATRO PONTOS	43
3.5.	MODOS DE FALHA.....	43

3.6.	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NA FLEXÃO (MOE)	44
3.7.	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA (MOR)	45
3.8.	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS	45
4.	RESULTADO E DISCUSSÕES	46
4.1.	MASSA ESPECÍFICA APARENTE	46
4.2.	CURVAS FORÇA × DESLOCAMENTO	46
4.3.	MODOS DE FALHAS	48
4.4.	MÓDULO DE ELASTICIDADE NA FLEXÃO (MOE)	51
4.5.	MÓDULO DE RUPTURA (MOR)	55
5.	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	60
	ANEXO I – NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK E ANOVA DE WELCH PARA O MOE (V2)	65
	ANEXO II – NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK E ANOVA DE WELCH PARA O MOE (V3)	66
	ANEXO III – NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK E ANOVA DE WELCH PARA O MOR (V2)	67
	ANEXO IV – NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK E ANOVA DE WELCH PARA O MOR (V3)	68

1. INTRODUÇÃO

A ampliação do segmento industrial madeireiro, por meio do beneficiamento e do desenvolvimento de produtos de maior valor agregado, é fundamental para a manutenção e para manter aquecido o setor madeireiro (PALMA; BALLARIN, 2011). Esta premissa é válida, especialmente, para as espécies de reflorestamento, como *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp., que apresentam rápido crescimento e estão entre as principais espécies exportadas no Brasil. Outro fator que movimenta o setor madeireiro é a ampla exportação de madeira serrada bruta, pois possui um baixo valor agregado, devido à baixa qualidade do acabamento superficial no desdobro das toras (DE ARAUJO *et al.*, 2017).

A fabricação dos então denominados “produtos de madeira engenheirada” busca agregar valor aos produtos à base de madeira e oferecer ao mercado produtos com elevado desempenho estrutural, térmico e acústico, podendo variar conforme sua aplicação final. Alguns dos compostos que fazem parte desse grupo de produtos são a madeira lamelada colada (MLC), madeira laminada colada (LVL), *oriented strand board* (OSB) e madeira lamelada colada cruzada (MLCC), sendo fabricados, primordialmente, com espécies de rápido crescimento e de menor valor agregado (PALMA; BALLARIN, 2011).

O LVL, por exemplo, é um tipo de material de madeira engenheirada de alto desempenho, composto por uma série de lâminas de 1,2 mm a 6 mm de espessura, coladas com adesivos de base fenólica nas faces adjacentes, com orientação paralela entre as fibras. É comumente utilizado em construções em madeira, por apresentar elevada resistência mecânica e homogeneidade em suas propriedades, podendo ainda superar grandes vãos livres (LI *et al.*, 2020). A utilização do LVL em estruturas se dá na forma de elemento estrutural ou na composição de seções de outros elementos estruturais, como por exemplo em vigas I (BAL, 2014).

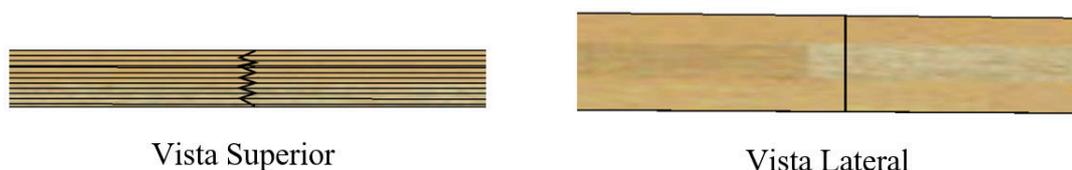
No Brasil, a Ekomposit é uma das poucas empresas que dispõem de tecnologia produtiva para a fabricação do LVL, dispondo de uma planta fabril de mais de 17.000 m², localizada na cidade de Lages, SC. Os painéis de LVL fabricados por esta empresa são confeccionados com madeira oriunda de florestas plantadas do gênero *pinus* e servem de material de base para a produção de vigas, caibros, ripas, forros, paredes e pisos. Esses últimos, por sua vez, são destinados ao mercado nacional da construção. As chapas utilizadas para produzir LVL apresentam as dimensões de 1220 mm × 2440 mm, de largura e comprimento, respectivamente. As espessuras das chapas variam entre 38 mm, 45 mm, 75 mm e 90 mm, sendo

38 mm, por questões de fornecimento de caibros e de barrotes de menores dimensões, a espessura utilizada para confecção das vigas em LVL.

Os produtos da empresa Ekompisit vêm passando por um contínuo aperfeiçoamento juntamente com o próprio processo de produção e de capacitação de toda equipe. Atualmente, para a confecção de vigas em LVL, a Ekompisit fabrica vigas com vão de, no máximo, 2,20 m, sem que haja emendas longitudinais nas chapas.

De forma geral, os tipos de emendas utilizadas para a extensão longitudinal dos painéis LVL são as emendas dentadas e biseladas (JOKERST, 1981). A empresa Ekompisit faz uso das emendas dentadas, utilizando-as para aumentar o comprimento útil de vigas em LVL, sendo utilizada apenas uma emenda ao longo da viga, alocada ao centro do elemento (Figura 1).

Figura 1 – Viga em LVL com emenda dentada.



Fonte: autor (2023).

As vigas são formadas pela justaposição vertical de chapas de LVL, e as emendas são realizadas para a união desses painéis, possibilitando a produção de vigas capazes de vencer maiores vãos do que os atuais 2,20 m, assegurando uma garantia de 20 anos para o material colado e a resistência das uniões dentadas dos painéis de LVL que compõem os elementos estruturais, em concordância com as normativas vigentes (APA, 2000; ASTM. D5456-10^a; ASTM. D1037. NBR 7190).

Os elementos de viga que possuem emendas dentadas na seção transversal, em especial na região de momento fletor máximo, apresentam modos de falha frágeis devidos a emenda dentada. Estas emendas apresentam comportamentos distintos em função dos adesivos utilizado, de fatores geométricos e ambientais, sendo, frequentemente, consideradas elos fracos do elemento estrutural (ÖZÇİFÇİ; OKÇU, 2008; SERRANO; GUSTAFSSON, 1999).

As vigas em LVL são elementos estruturais construídos em várias dimensões e, quando expostos ao meio ambiente, reagem a uma série de fatores ambientais, como intempéries e biodegradação, embora em menor grau que outros produtos engenheirados, como

MLC e CLT, que apresentam maior proporção de madeira maciça (SINGH, PAGE e SIMPSON, 2019). Por se tratar de um elemento estrutural, durante toda a vida útil, as vigas devem apresentar níveis de segurança aceitáveis para as ações de projeto definidas por normas (NBR 7190; GILBERT; ZHANGB; BAILLERES, 2019), fazendo-se necessária a avaliação do desempenho mecânico das vigas em LVL com presença de emendas dentadas para maior confiabilidade e viabilizar a utilização destes elementos para fins estruturais.

Neste contexto, a empresa Ekomposit, procurando aprimorar seus processos produtivos e elevar a qualidade intrínseca de sua linha de produtos, se propôs a apoiar o trabalho científico destinado a avaliar o impacto da distância entre emendas dentadas na rigidez e na resistência de vigas de madeira laminada colada (LVL).

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar, experimentalmente, o comportamento mecânico na flexão a quatro pontos de vigas em LVL, com a presença de emendas dentadas.

Os objetivos específicos são:

- avaliar, experimentalmente, a resistências de vigas de LVL, com e sem emendas dentadas, bem como a influência do comprimento do transpasse entre emendas dentadas neste parâmetro;
- avaliar os modos de falhas das vigas de LVL em função do transpasse das emendas dentadas;
- determinar as reduções da resistência e da rigidez das vigas devido às emendas;
- propor alterações na confecção das vigas, quanto ao transpasse entre emendas dentadas, visando uma maior resistência do elemento ao esforço de flexão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A MADEIRA

Sendo um dos materiais mais antigos do mundo, a madeira desempenha um papel importante no desenvolvimento das atividades humanas. Por séculos, a madeira vem sendo utilizada como material de construção, tendo como forte característica a sua leveza, mantendo uma excelente relação resistência-peso.

Com o avanço da ciência e da tecnologia, uma gama de produtos preservativos possibilitou um aumento na durabilidade da madeira, enquanto subprodutos derivados da madeira, como compensados, aglomerados e outros painéis oriundos do processo de laminação estavam em forte desenvolvimento (ISSA; KMEID, 2005). Com isso, a utilização da madeira para fins estruturais na construção civil encontra-se em alta, trazendo com seus sistemas construtivos atributos como leveza, rapidez e relevantes benefícios ambientais, principalmente por seus produtos engenheirados, por se tratar de um material de fonte natural e renovável, com benefícios econômicos em relação ao concreto e ao aço na construção civil (HAKKARAINEN *et al.*, 2019; QIN *et al.*, 2021). Com tudo, a madeira maciça possui certas características, muitas das vezes indesejadas, tais como nós, rachaduras por tensões de crescimento e comprimentos limitados. A anisotropia, a variação dimensional devida à umidade e a alta variabilidade de propriedades físicas e mecânicas também são grandes responsáveis pela redução de segmentos em que a madeira maciça pode ser utilizada (BAL, 2014; PALMA; STEIGER, 2020).

Para oferecer uma alternativa à madeira maciça, contornando questões impostas pela natureza do material, a laminação da madeira é usada para produzir diversos subprodutos, pertencentes aos grupos dos produtos de madeira engenheirada, que podem adotar diversas formas (curvas, cônicas, nervuradas), atendendo objetivos arquitetônicos e estruturais (KESKIN, 2009). Os produtos laminados à base de madeira, como LVL e madeira lamelada colada (MLC), podem ser fabricados industrialmente, proporcionando elevados padrões de qualidade e grande escala de produção (HAKKARAINEN *et al.*, 2019).

2.2. LAMINATED VENEER LUMBER (LVL)

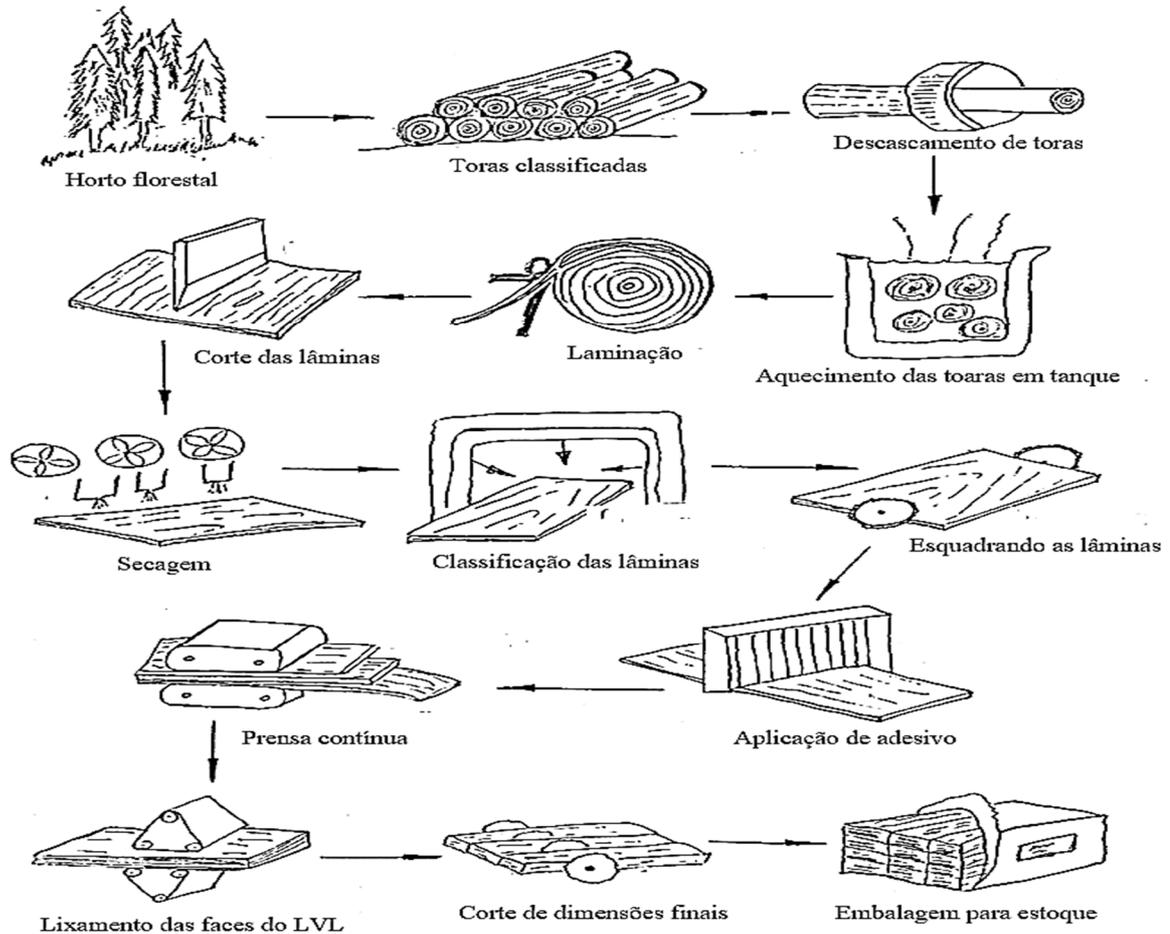
O LVL é um dos compósitos laminados de madeira utilizado para substituir a madeira serrada em diversas aplicações estruturais, como elementos estruturais pré-fabricados (BAL,

2014; FOREST PRODUCTS LABORATORY (US), 1987). O LVL é um produto engenheirado, formado por uma série de lâminas de madeira com as fibras dispostas paralelamente, coladas face-a-face. As lâminas utilizadas são advindas da laminação de toras de diâmetros variados em torno industrial, principalmente toras de espécies de rápido crescimento e de média/baixa densidade ($290-693 \text{ kg.m}^{-3}$). As espécies de reflorestamento são as mais utilizadas para a produção de LVL, como as dos gêneros *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. Nos Estados Unidos, as espécies de abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), Álamo (*Populus nigra*) e Pinheiro do Sul (*Pinus albicaulis*) são as mais utilizadas, enquanto na Nova Zelândia e em países do sudeste asiático, as espécies de *Pinus albicaulis* e Seringueira (*Hevea brasiliensis* L.) são amplamente utilizadas (HIZIROGLU, 2009).

Na produção do LVL, após a laminação das toras e o corte das lâminas, as mesmas são secas a um teor de umidade de 5-6%, a fim de conferir maior estabilidade no condicionamento climático do painel e uma cura mais rápida na linha de cola (FOREST PRODUCTS LABORATORY, US, 1987). A colagem das lâminas é feita por meio de adesivos de base fenólica ou melamínico que formam as linhas de cola, onde a espessura média das lâminas é de 3 mm, sendo 6 mm o limitante superior, conforme a normativa (EN 14374, 2005). As etapas que compõem o processo produtivo do LVL estão ilustradas na Figura 2. (AWALUDIN; IRAWATI; SHULHAN, 2019; EN 14374, 2005; HAKKARAINEN *et al.*, 2019).

As dimensões finais dos painéis LVL dependem de fatores, como limitações de equipamentos da linha de produção, uso final ao qual o painel é destinado e em questões referentes ao transporte e ao manuseio destes. Na Finlândia, as dimensões mais utilizadas para os painéis LVL são de 2500 mm de largura e 2400 mm de comprimento, sendo a espessura variável entre fabricantes (STEICO, 2021). No Canadá, as espessuras encontradas para os painéis LVL consistem entre 19 mm e 178 mm, enquanto seu comprimento também pode chegar a 2400 mm (CWC, 2021). No Brasil, os painéis LVL são produzidos com dimensões de 1220 mm de largura, 2440 mm de comprimento e espessuras entre 38 e 45 mm. Já quando utilizados em vigas, podem atingir até 1200 mm de comprimento útil.

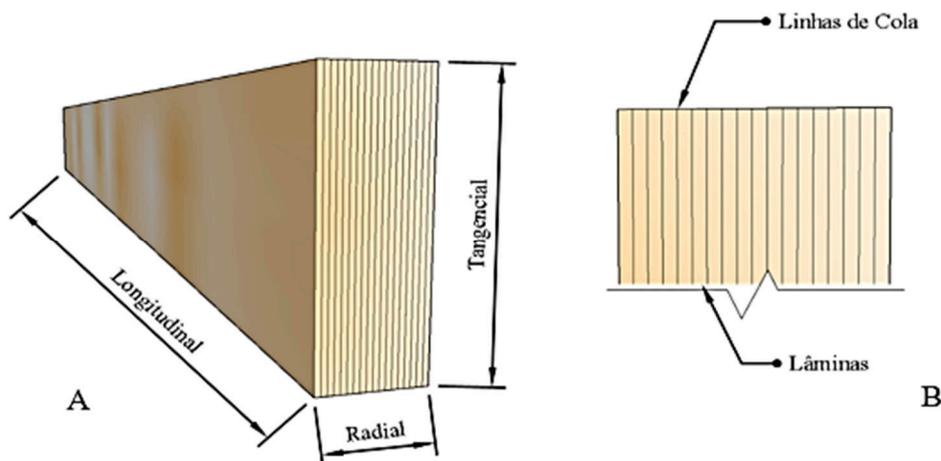
Figura 2 – Cadeia produtiva do LVL.



Fonte: adaptado de (HIZIROGLU, 2009).

No processo de laminação, defeitos naturais das toras (nó, bolsas de resinas, tensões de crescimento, por exemplo) que podem interferir na resistência mecânica da madeira, são dispersos em pequenos fragmentos ao longo das lâminas, reduzindo o impacto destes defeitos no comportamento mecânico do LVL. No processo de colagem, a disposição unidirecional das lâminas proporciona ao LVL três eixos ortotrópicos bem definidos, o que confere uma grande uniformidade das propriedades físico-mecânicas ao painel (Figura 3) (HAKKARAINEN *et al.*, 2019). Apesar da limitação de espessura das lâminas, essa limitação não se reflete nas dimensões do LVL, sendo possível a produção de grandes painéis mesmo com toras de pequeno diâmetro. Com isso, pode-se utilizar toras que seriam destinadas a fins de menor valor agregado, promovendo rendimento e menor desperdício (AWALUDIN; IRAWATI; SHULHAN, 2019).

Figura 3 – *Laminated Veneer Lumber (LVL)*.



Onde: A: eixos anisotrópicos; B: corte transversal

Fonte: autor (2023).

O processamento mecânico do LVL é de fácil usinagem, podendo o mesmo ser serrado, fatiado, perfurado e entalhado, assim como é feito para a madeira serrada. Permitindo assim, uma excelente trabalhabilidade do material e ajustes nas peças realizados fora do ambiente fabril de produção (CHEN *et al.*, 2016).

A produção do LVL, de acordo com (FOREST PRODUCTS LABORATORY, US, 1987) e (HIZIROGLU, 2009), teve início em 1941 com seu uso voltado para produção de peças de alta resistência em aeronaves, por possuir uma boa relação resistência-peso. Entretanto, somente no início da década de 1970, as indústrias norte-americanas e canadenses do setor de painéis voltaram-se para atender a demanda por LVL para fins estruturais. Na construção civil, o LVL pode ser empregado como vigas de seção retangulares, “*flange*” ou “*mesas*” de vigas I, sistema de forros e coberturas, entre outras funções que exijam resistência na direção longitudinal do painel LVL (BAL, 2014; IWAKIRI *et al.*, 2010).

2.2.1. Propriedades físico-mecânicas do LVL

No que se refere à influência da composição do LVL nas propriedades mecânicas, a disposição unidirecional das lâminas confere maior resistência longitudinal, possibilitando seu uso em sistemas que possam requerer maior resistência à flexão estática, diferentemente do

painel compensado, onde as lâminas são dispostas com orientação perpendicular das fibras (IWAKIRI *et al.*, 2010).

A resistência à flexão do LVL é, em geral, superior ao da madeira maciça, pois o material é isento de defeitos, como nós e grã irregular, e apresenta maior uniformidade, sendo obtidos valores até 33% superiores (EL HAOUZALI *et al.*, 2020). Este aumento de resistência mecânica deve-se à distribuição uniforme de defeitos naturais (POT; DENAUD; COLLET, 2015). Neste ponto, é válido destacar o conceito de distribuição de tensões em camadas, no qual as lâminas próximas às extremidades do painel contribuem mais para o módulo de Young (E) e para o módulo de ruptura (f) do que as lâminas mais próximas à linha neutra de uma viga laminada (BODIG; JAYNE, 1982). Para Iwakiri *et al.* (2010), o fato de as lâminas externas serem mais influentes na resistência do painel, possibilita o uso de lâminas de espécies mais resistentes nas extremidades, configurando um painel laminado híbrido quanto às espécies utilizadas, desde que as densidades das espécies sejam próximas.

As propriedades físico-mecânicas do LVL podem variar de acordo não apenas com processo produtivo, como a espessura da lâmina, espessura da linha de cola, adesivo e pressão de colagem, mas também podem ser influenciadas pela espécie utilizada e pela posição da tora em que a lâmina foi retirada da tora (EL HAOUZALI *et al.*, 2020). Em relação à espessura das lâminas, os menores valores de resistência são obtidos com lâminas retiradas próximas à medula da tora, do que em regiões mais externas, o que pode ser explicado pela menor proporção de nó em regiões próxima à casca do que em partes mais ao centro da tora (PURBA *et al.*, 2019). De Melo; Del Menezzi (2014); H'ng; Paridah; Chin (2010) afirmam que os módulos de Young (E) e de ruptura (f) são superiores em painéis constituídos por lâminas de menores espessuras, como 1,54 mm e 2,6 mm, apresentando valores de 9845 MPa, 8301 MPa, para rigidez, e 52,51 MPa e 48,59 MPa, para módulo de ruptura, respectivamente. Esta afirmação é baseada na maior quantidade de adesivo necessário para obter o painel LVL de lâminas mais finas, em função do aumento do número de linhas de cola, o que confere não apenas maior módulo de elasticidade, mas também maior densidade ao painel.

O uso de lâminas mais finas também proporciona uma melhor distribuição de grãos inclinadas e de rachaduras. Segundo El Haouzali *et al.* (2020), a variação das espessuras das lâminas não se reflete, estatisticamente, na tensão de ruptura, afirmando assim que a espessura da lâmina não penaliza esta propriedade mecânica. Além disso, por possuir uma maior estabilidade dimensional, há uma menor probabilidade de distorção e de empenamentos no

LVL, quando na presença de um elevado gradiente de umidade e de temperatura (CHEN *et al.*, 2016).

Quanto à densidade dos painéis LVL, Shukla, Rao & Sharma (1999) constataram que, devido ao processo produtivo de colagem de lâminas finas à alta pressão, o LVL apresenta uma densidade superior à da madeira serrada e da madeira laminada colada de mesma espécie. Para espécies de baixa densidade, como as do gênero *Pinus* sp., a produção de LVL possibilita o uso desta espécie em aplicações que demandem alta resistência mecânica.

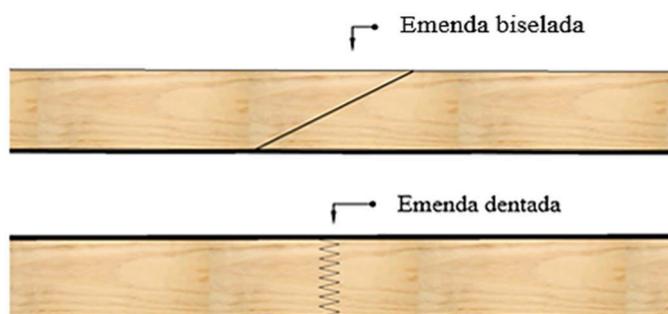
Questões quanto à preservação da madeira em relação a agentes xilófagos e deteriorações também se refletem no LVL, embora em menor ocorrência. A aplicação de preservantes, que são escolhidos em função do destino do material, evita que o elemento estrutural e derivados em madeira se deteriorem facilmente, prevenindo o desenvolvimento de fungos emboloradores e causadores de manchas, de ataque de agentes xilófagos e da permeabilidade de umidade. A não utilização de preservantes e ocorrências destes incidentes, resulta em uma perda de propriedades físico-mecânicas do material, que, por consequência, comprometem o uso do elemento em um curto espaço de tempo, sendo necessário o reparo ou até mesmo a substituição antes que ocorra o fim da vida útil da peça (KESKIN, 2009).

2.3. EMENDAS DENTADAS

Executar a união entre peças de madeira é considerada, conforme Jokerst (1981), uma tarefa desafiadora e muitas vezes difícil de ser realizada. Contudo, emendas em madeira podem ser efetuadas de forma eficiente com o uso de adesivos químicos e técnicas de colagem. Uma das técnicas para a colagem é a usinagem de biselas, a fim de proporcionar um aumento na área de colagem.

Houve tentativas de usinagem de diferentes configurações para emendas longitudinais na madeira, entretanto algumas eram de difícil usinagem, enquanto outras o problema estava relacionado à baixa resistência mecânica oferecida pela junta. Entre os mais variados tipos de emendas longitudinais, as emendas biseladas e emendas dentadas são as mais difundidas para realizar esta tarefa (Figura 4).

Figura 4 – Emendas biselada e dentada.



Fonte: autor (2023).

Durante muito tempo, as juntas biseladas estiveram em destaque, sendo o padrão de comparação para juntas em desenvolvimento. Entretanto, fatores como o grande desperdício de madeira para unir duas peças, a qualidade da superfície usinada ser determinante na colagem e a dificuldade em manter um padrão de qualidade em linha de produção, proporcionando desempenho mecânico bastante variável, levaram à substituição das juntas biseladas pelas emendas dentadas (JOKERST, 1981).

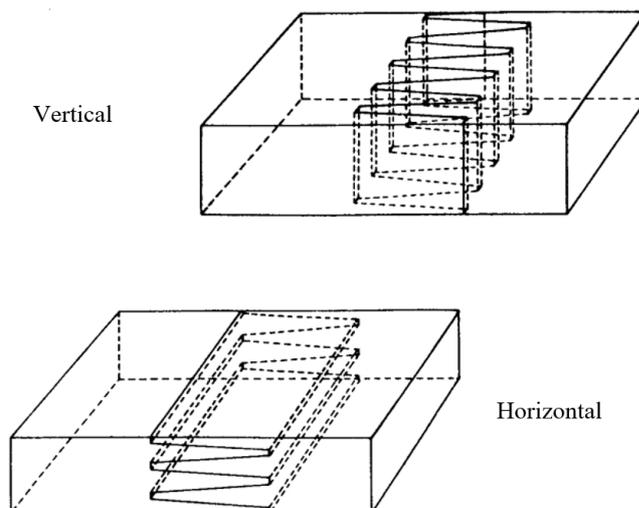
As articulações do tipo dentadas são consideradas múltiplos das emendas biseladas. As primeiras aparições de produtos de madeira com emendas dentadas foram relatadas no cenário automotivo, para fabricação da direção dos veículos em meados de 1920 (JOKERST, 1981). Para fins estruturais, as emendas dentadas vêm sendo utilizadas desde pouco antes da Segunda Guerra Mundial, para a fabricação de vigas de madeira laminadas, antes mesmo da utilização de adesivos sintéticos, sendo utilizados, por exemplo, adesivos a base de caseína (DUTKO; STELLER; KOZELOUH, 1982).

O uso de emendas dentadas possibilita aproveitar peças de madeira com comprimentos variados na produção de elementos estruturais, seja para reforço dos elementos já existentes ou para substituições de peças (LOKAJ; VAVRUSOVA; MIKOLASEK, 2017). Emendas dentadas, para ligações longitudinais em peças de madeira serrada e chapas, permitem que elementos estruturais de madeira engenheirada vençam grandes vãos, limitando-se apenas a parâmetros de produção industrial.

Tanto na emenda dentada quanto na biselada, a transferência de esforços se dá pelo contato das superfícies inclinadas. Com isto, a espessura pontas dos dentes são vistas como pontos de concentração de tensões, portanto, esse valor deve ser o menor possível, a fim de minimizar a concentração de tensões nas pontas de dentes (DUTKO; STELLER; KOZELOUH, 1982).

A orientação das emendas dentadas, em relação a largura e a espessura de uma peça (Figura 5), também é um ponto importante para o projeto, produção e uso final das emendas dentadas. Juntas com disposição horizontal são uma alternativa interessante do ponto de vista estético, onde os dentes não são visíveis ao plano de maior dimensão da peça, sendo muito utilizado para fins não estruturais, como móveis, quadros e painéis decorativos. Quanto à resistência mecânica, as emendas dentadas horizontais apresentam menor resistência mecânica que as emendas verticais. Isto justifica-se pelo fato de que, em emendas dentadas horizontais, os dentes próximos as faces tendem a possuir uma linha de cola mais espessa, devido à saída do excesso de adesivo na pressão final. Linhas de cola mais espessas apresentam menor resistência mecânica e, na região das bordas externas das peças onde há grande concentração de tensões, enfraquecem a resistência mecânica na emenda dentada. Soluções como aplicação de pressão lateral no momento da colagem das peças são utilizadas para minimizar este efeito (JOKERST, 1981).

Figura 5 – Orientações de emendas dentadas nas peças de madeira.



Fonte: adaptado de (JOKERST, 1981).

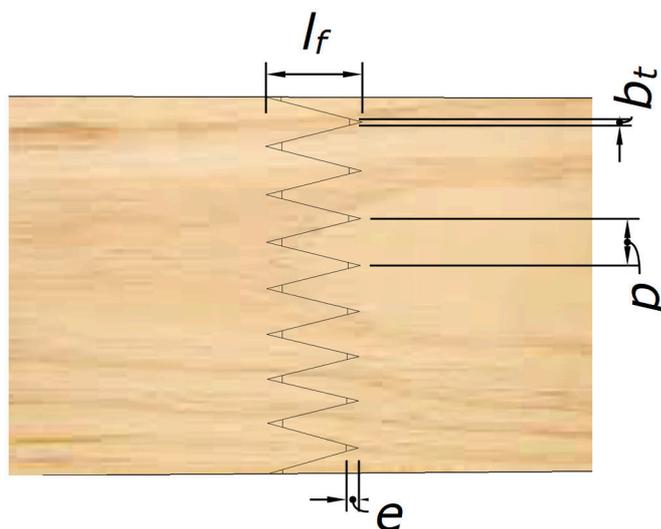
Já as emendas dentadas em disposição vertical apresentam maior resistência mecânica para o esforço de flexão, por apresentarem maior uniformidade na espessura da linha de cola e nas tensões, ambas ao longo da seção. No esforço à flexão, todos os dentes verticais são carregados e não apenas os das bordas, como acontece nas emendas dentadas horizontais. Isto confere uniformidade na distribuição de tensões na seção colada, proporcionando uma melhor resistência mecânica (JOKERST, 1981). Para o esforço de tração, segundo Pellerin *et al.*

(1970), as emendas dentadas verticais e horizontais, se produzidas com cuidado, apresentam valores semelhantes.

No LVL, as emendas são usinadas após a produção do painel, a fim de obter comprimentos maiores que os padrões oferecidos pelos painéis comerciais. Posteriormente, as chapas de LVL são coladas, face-a-face com adesivo estrutural, “empilhando” as chapas até atingir a espessura desejada. Este processo é similar ao que ocorre para produção de madeira laminada colada (MLC), onde as emendas são perfiladas e coladas antes que haja a colagem das lamelas (FOREST PRODUCTS LABORATORY, US, 1987). A distância entre as emendas dentadas, conforme o LVL Handbook European, deve estar situada entre 1,9 e 2,5 m e a orientação da emenda (vertical ou horizontal) é determinada pelo projetista, ao especificar o lado das peças que ficará visível na estrutura (HAKKARAINEN *et al.*, 2019).

As emendas dentadas são dimensionadas em função de parâmetros que variam em função do esforço solicitante e ao uso final de cada elemento com articulações de emenda dentada. Estes parâmetros são o comprimento de dente (l_f), o passo de dente (p), o ângulo de inclinação de dente (α), a espessura da ponta de dente (b_t) e o espaçamento entre a ponta de dente e a base do dente da outra superfície (e) (Figura 6) (JOKERST, 1981).

Figura 6 – Parâmetros que compõem a emenda dentada



Fonte: autor (2023).

Para aplicações em ligações e emendas longitudinais dos painéis LVL e produtos laminados de madeira, as emendas dentadas estão entre as mais adequadas, pois quando confeccionadas adequadamente, apresentam boa eficiência na transferência de esforços nos

elementos. Quando há uma distribuição congruente de emendas dentadas ao longo do sólido, ocorre uma melhor distribuição de tensões no elemento como um todo e minimiza o efeito da emenda proporcionar uma menor resistência (FOREST PRODUCTS LABORATORY (US), 1987). Os elementos de composição, parâmetros de produção segundo normativas e de mais informações a respeito das emendas dentadas serão abordadas no tópico abaixo.

2.3.1. Fatores de influência na produção de emendas dentadas

Alguns fatores inerentes à madeira e aos processos industriais são apontados como sendo de extrema importância para garantir a resistência mecânica da emenda dentada, tais como: densidade, porosidade e umidade da madeira; adesivo utilizado; qualidade da superfície de colagem; pressão de colagem e tempo de cura e parâmetros geométricos do perfil do dente (KHELIFA *et al.*, 2016). Eles serão apresentados a seguir com mais detalhes.

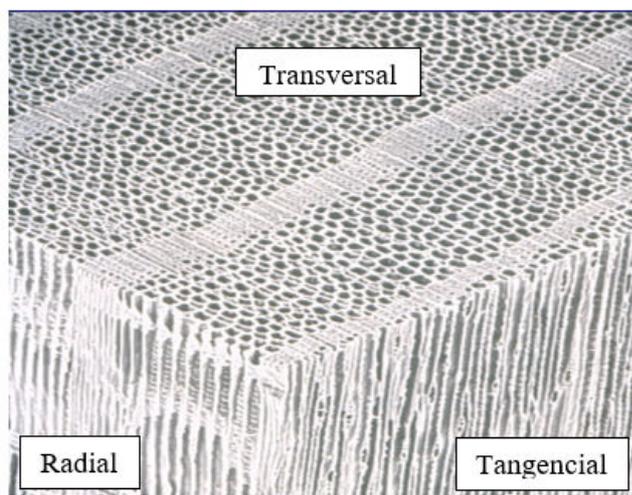
2.3.1.1. Densidade, porosidade e teor de umidade

A densidade, a porosidade e o teor de umidade estão diretamente relacionados à adesão no processo de colagem da madeira, bem como na produção de emendas dentadas. Espécies de madeira com maior densidade possuem paredes celulares mais espessas e pequenos volumes de lúmen, enquanto o inverso é observado para espécies de média-baixa densidade (IWAKIRI *et al.*, 2010). Madeiras com maiores densidades possuem uma maior resistência mecânica, justamente por apresentarem maior proporção de massa lenhosa em seu interior. A resistência de ligações coladas aumenta proporcionalmente com a densidade até uma faixa de 0,7 a 0,8 g.cm⁻³. Acima desta faixa, as ligações coladas apresentam menor resistência mecânica, devido ao menor volume de lúmen, que dificulta a penetração do adesivo na peça de madeira. Uma maior pressão de colagem se faz necessária neste caso, o que pode ocasionar grandes concentrações de tensões na região colada (FOREST PRODUCTS LABORATORY, US, 1987).

O volume de espaços vazios da madeira pode variar entre 46 a 80% do volume total, o que afeta diretamente a direção que o adesivo flui dentro da madeira. O plano transversal da peça de madeira possui uma maior porosidade em relação aos planos radial e tangencial (Figura 7). Isto acarreta uma penetração excessiva de adesivo quando a pressão é aplicada. Este fenômeno é um dos principais desafios na colagem longitudinal de peças de madeira. As

espécies do gênero *Pinus* sp., por exemplo, são altamente porosas, pois apresentam lúmens grandes. Para superar esses fatores, a escolha do adesivo deve ser feita em função da espécie de madeira, sendo possível encontrar comercialmente adesivos específicos para madeiras de baixa e de alta densidade (ROWELL et al., 2005).

Figura 7 – Microscopia dos planos anatômicos da espécie *Pinos elliottii*.



Fonte: adaptado de Gomide (2018).

Pereira *et al.* (2016) afirmam que a densidade da madeira possui forte influência sobre a resistência à tração na ligação, pois a emenda é realizada no topo onde as fibras estão dispostas transversalmente e em madeira mais densas apresentam uma maior proporção por unidade de área.

O teor de umidade na madeira é de extrema importância, sendo essa a principal responsável por variações dimensionais dos elementos de madeira, que, por sua vez, reflete em consequências significativas no desempenho das juntas coladas de madeira, como o desenvolvimento de tensões na região da junta. Estas tensões internas podem ser grandes o suficiente para romper as ligações adesivo-madeira. Isso pode levar a ruptura de em peças adjacentes. Este fenômeno é observado principalmente em juntas coladas em que ambas as peças possuam direção de grã diferentes, onde cada direção apresenta coeficientes de retratibilidade diferentes. O uso de adesivos estruturais em juntas de madeira, normalmente, absorve e transmite estas tensões, pois possuem, em geral, um maior módulo de elasticidade que a madeira (FOREST PRODUCTS LABORATORY, US, 1987).

Adicionalmente, a umidade da madeira, somado a água presente do adesivo, afeta a cura, o fluxo e a penetração do adesivo. Para uso em produtos laminados, como o LVL, o recomendado é um teor de umidade de 10 a 12% de umidade no momento da colagem (FOREST PRODUCTS LABORATORY, US, 1987).

2.3.1.2. Adesivos

Os polímeros sintéticos, que são quimicamente processados em adesivos para colagem de madeira, podem ser basicamente divididos em dois grupos: os termoplásticos e os termofixos (OZKAYA *et al.*, 2013). O primeiro, é composto por cadeias poliméricas longas, que amolecem e enrijecem com a variação de temperatura e, geralmente, possuem menor resistência ao calor, à umidade e aos carregamentos estáticos de longa duração. Os adesivos termoplásticos mais comuns encontrados comercialmente são o acetato de polivinila (PVA) e os elastômeros, como por exemplo o Poliuretano termoplástico (TPU) e os Copolímeros de etileno-acetato de vinila (EVA). Já adesivos termofixos são excelentes para fins estruturais, pois apresentam, quando curados, modificação química irreversível frente a questões climáticas e ao ambiente de exposição. Adesivos termofixos apresentam rigidez para suportar grandes carregamentos estáticos por longos períodos, sem que ocorram deformações. Os principais adesivos, da classe dos termofixos, são os fenólicos, resorcinólico, melamínicos, isocianatos, a base de ureia e os epóxis (FOREST PRODUCTS LABORATORY, US, 1987).

Para ligações longitudinais de madeira, com emendas dentadas, podem ser utilizados, basicamente, quaisquer adesivos, porém o método de colagem, a cura do adesivo e, principalmente, o uso final pretendido para o elemento a ser colado, são os fatores limitantes na escolha dos adesivos. No caso da colagem de emendas dentadas que estão expostas ao exterior e às intempéries, a escolha dos adesivos se limita aos fenólicos, resorcinólicos e melamínicos (PEREIRA *et al.*, 2016), pois os adesivos a base de ureia são degradados quando expostos ao calor e à umidade, enquanto adesivos polivinílicos, sob as mesmas condições climáticas, permitem a fluência sob aplicação de uma carga. Logo, adesivos como melamina-ureia, ureia e PVAs são amplamente utilizados na colagem de madeira e de emendas dentadas, porém de uso não estrutural (JOKERST, 1981).

A gramatura (g.m^{-2}) aplicada na superfície de colagem é outro fator importante no desempenho mecânico da ligação e no custo, pois uma linha de cola muito espessa acarreta maior consumo de adesivo. Os valores de gramatura para adesivos de base fenólica mais

utilizados para painéis estruturais, estão entre 330 e 480 g.m⁻² (IWAKIRI *et al.*, 2010; LIMA *et al.*, 2011).

2.3.1.3. *Qualidade da superfície de colagem*

A qualidade da superfície da madeira, na seção a ser colada, é um dos fatores determinantes no desempenho da emenda colada. Uma superfície bem-preparada para a colagem permite a penetração e o fluxo adequados ao adesivo empregado, livre de qualquer material que possa interferir na ligação. No processo de colagem, é altamente recomendado que a usinagem da superfície das peças a serem coladas seja realizada em um tempo não superior a 24 horas que antecedem o processo, a fim de evitar acúmulos de poeira ou de extrativos na face de colagem. Uma superfície de colagem aplainada confere uniformidade na dispersão do adesivo e na espessura da linha de cola (FOREST PRODUCTS LABORATORY, US, 1987).

O ângulo de contato, formado por uma gota de água em relação à superfície do substrato, também é um parâmetro relevante quanto à qualidade da superfície na penetração do adesivo. Ângulos de até 45° indicam um bom comportamento quanto ao umedecimento da madeira, enquanto ângulos de contato superiores à 90° são indícios de um umedecimento incompleto da superfície, sendo um preditivo de baixa resistência mecânica (PIZZI; MITTAL, 2011).

2.3.1.4. *Pressão de colagem e tempo de cura*

A pressão de colagem e o tempo de cura desempenham um papel fundamental no processo de colagem da madeira. A adequada pressão final utilizada em prensas de colagem de emendas dentadas é variável com a densidade, a reatividade do adesivo empregado e, principalmente, a geometria do dente. A função da pressão, na colagem, é unir as superfícies dos substratos que, por intermédio do adesivo, formam uma camada fina e contínua (BUSTOS *et al.*, 2003). Segundo a norma DIN 68 140 (1971), em espécies de coníferas, que em geral possuem média-baixa densidade (< 0,75 g.m⁻³), a pressão de colagem varia entre 12 MPa (com um comprimento de dente de 10 mm) e 2 MPa (com um comprimento de dente de 60 mm), sendo o acréscimo de pressão inversamente proporcional ao aumento do comprimento de dente. Para madeiras de folhosas, os valores de pressão são acrescidos em 30%.

O tempo de cura dos adesivos é determinante para garantir a completa adesão na colagem de superfícies de madeira, bem como de emendas dentadas, e está intimamente relacionado com o tipo de adesivo empregado. Quando utilizados adesivos não estruturais, como os polivinílicos, o tempo de cura é altamente variável, em função da evaporação da água contida no adesivo, podendo estar entre 10 min e 3 h (à 20 °C) e com uma pressão aplicada de 1 MPa (SHIELDS, 1984). Para adesivos com finalidade estrutural, como resorcinol-formaldeído e fenol-formaldeído, o tempo de cura é estimado no intervalo de 8 a 15 h (a 20 °C), tanto para madeiras de coníferas, quanto de folhosas (SHIELDS, 1984).

Segundo Bustos *et al.* (2003), em geral, os adesivos devem ser aquecidos, a fim de diminuir o tempo de cura. Este aquecimento pode ser feito por meio de radiofrequência ou forno convencional. No caso da radiofrequência, o teor de umidade deve ser baixo (< 10%) e uniforme em toda peça, evitando assim formação de bolsas de umidade nos substratos a serem colados, o que absorveria maior energia no aquecimento e proporcionaria desuniformidade na cura do adesivo.

2.3.1.5. Geometria da emenda dentada

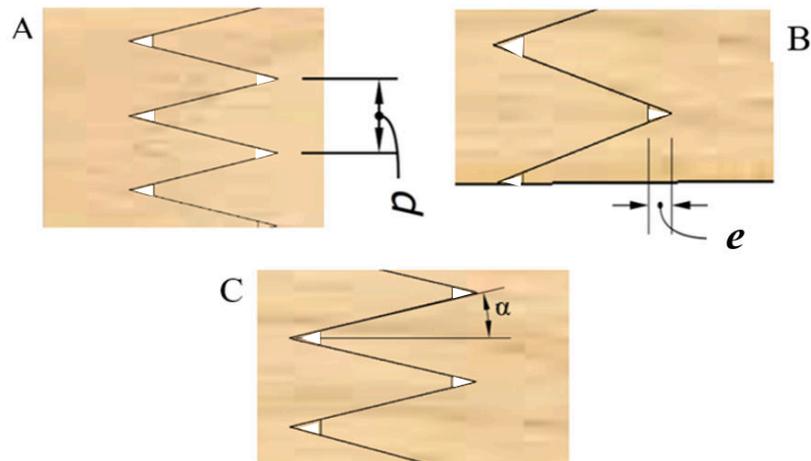
A escolha da configuração da geometria de dente a ser utilizada está diretamente relacionada com a aplicação final da peça a ser colada, sendo um fator importante na determinação da resistência mecânica da junta (HABIPI; AJDINAJ, 2015).

Segundo Özçifçi *et al.* (2008), há um acréscimo substancial na tensão de ruptura e no módulo de elasticidade, quando ocorre o aumento do comprimento de dente. Este acréscimo está relacionado à maior área de contato na colagem, acarretando uma melhor distribuição de tensões na região da ligação e, conseqüentemente, uma maior resistência mecânica oferecida pela emenda dentada. Entretanto, mesmo com a melhora na resistência mecânica na região da emenda, com o aumento do comprimento de dente, Pereira *et al.* (2016) obtiveram cerca de 47,72% da resistência da madeira livre de emendas e de defeitos, quando submetida ao esforço de tração na região da emenda. Fatores como adesivos e condição de colagem, como as apresentadas, contribuem diretamente para o desempenho da resistência das emendas dentadas.

Alterações nos parâmetros de passo e de ângulo de dente (Figura 8A – 8C) refletem, majoritariamente, na área efetiva de colagem, pois mantendo o comprimento de dente para menores angulações, proporciona-se uma maior área efetiva. Selbo (1963) define área de cola de duas superfícies laterais de dente como área efetiva de colagem da emenda (A_{ef}). Esta

especificação é devida às pontas de dentes que, em geral, não fazem contato com a área da base dos mesmos na colagem, originando as folgas de dentes (Figura 8B).

Figura 8 – Detalhe de elementos de emenda dentada.



A: Passo de dente; B: Folgas de ponta de dente

Fonte: autor (2023).

As folgas (e) entre as pontas e a base dos dentes acarretam a redução da resistência mecânica, pois, por questões de limitações de equipamentos, as pontas dos dentes representam pequenas emendas de topo. Estes espaços são preenchidos pelos adesivos e, nestas áreas praticamente não há transferência de esforços entre as peças. Logo os esforços são transmitidos, basicamente, por tensões de cisalhamento laterais ao longo das regiões inclinadas dos dentes. Para minimizar esta questão, a largura de ponta de dente deverá ser a menor possível, a fim de promover um melhor encaixe nas emendas dentadas (MACEDO, 1996).

A inclinação da grã também é apresentada como um fator de influência na transferência de esforços da emenda. (FOLLRICH *et al.*, 2014) avaliaram o efeito da inclinação da grã na colagem de longitudinal com faces lisas, onde constataram uma melhor resistência para grãs orientadas a 0° e uma queda de resistência para variações angulares entre 0° e 40° , utilizando adesivos de melamina-ureia-formaldeído e resorcinol-formaldeído.

2.3.2. Normativas para emendas dentadas estruturais

Neste subtópico, serão apresentados parâmetros para a produção e a classificação de emendas dentadas, conforme as organizações de padronizações alemã *Deutsches Institut für*

Normung (DIN), a europeia *European Standard* (EN) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

As três normativas apresentadas no Quadro 1 possuem semelhanças e algumas discrepâncias em relação aos parâmetros: tempo entre corte e colagem, cobertura de adesivo na superfície, diferença de umidade entre peças, pressão de colagem, tempo de prensa, comprimento de dente, passo de dente, espessura de ponta de dente, folga ponta de dente e base e distância entre nós e emendas. A norma NBR 7190:2022 possui algumas omissões quanto aos parâmetros de confecção das emendas e de geometria de dente, como, tempo entre corte e colagem (h), cobertura de adesivo na superfície (%), passo de dente (p), folga ponta de dente e base (e) e distância entre nós e emendas (mm).

Quadro 1 – Parâmetros normativos para emenda dentada.

Parâmetros		<i>DIN 68 140:1971</i>	<i>EN 15497:2014</i>	<i>NBR 7190:2022</i>
Tempo entre corte e colagem (h)		24	6	-
Cobertura de adesivo na superfície (%)		100	industrial: $\geq 75 lf$ manual: $100 lf$	-
Diferença de umidade entre peças (%)		< 5	< 5	< 5
Pressão de Colagem (MPa)	$lf = 10$ mm	Coníferas: 12 Folhosas: 15,6	12,5	$\rho < 0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ 12 $\rho > 0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ 14
	$lf = 60$ mm	Coníferas: 2 Folhosas: 2,6	4	$\rho < 0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ 2 $\rho > 0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ 4
Tempo de prensa (s)		2	esp < 45 mm 1 esp > 45 mm 2	2
Comprimento de dente (lf)	Min (mm)	7,5	15	10
	Max (mm)	60	60	60
Passo de dente (p)	Min (mm)	2,5	3,8	-
	Max (mm)	15	6,2	-
Espessura de ponta de dente (bt)	Min (mm)	0,2	0,42	$bt = 0,05 lf$
	Max (mm)	2,7	1	
Folga ponta de dente e base (e)		$e = lf / bt$	$e = lf / bt$	-
Distância entre nós e emendas (mm)		100	$\geq 3x$ diâmetro nó	-

Onde: ρ – densidade da madeira; esp – espessura da peça colada.

Na norma DIN 68 140, o tempo de 24 h sugerido entre a usinagem das peças de madeira a serem unidas e a colagem propriamente dita é considerada conservadora em comparação ao tempo de 6 h com a norma EN 15497:2014. Esses tempos indicados têm o objetivo de garantir a qualidade da colagem e a adesão adequada entre as superfícies de madeira,

considerando as características do processo de secagem e a interação entre as propriedades da madeira e do adesivo utilizado. Isso se deve a questões de qualidade da superfície a ser colada, onde espécies que contenham maior teor de resinas tendem a obstruir as fibras na região usinada, o que dificulta a penetração do adesivo. A norma NBR 7190 não indica um intervalo de tempo adequado para a colagem após usinagem dos substratos.

A cobertura da área de colagem com adesivo estrutural deve ser, independente do processo de montagem, igual a 100% para a norma DIN 64 140. Já para o Eurocode 5, devido à padronização dos processos industriais e ao controle de qualidade requerido, o adesivo pode cobrir 75% do comprimento do dente, desde que seja garantido que expila excessos de adesivos nas quatro faces da peça. A especificação para cobertura de adesivo nas emendas dentadas não é apresentada na norma NBR 7190:2022.

Quanto aos adesivos utilizados para colagem das juntas, a norma EN 15497 indica, para peças que demandem de elevados esforços e prezem a durabilidade, adesivos de poli condensação dos tipos fenólicos, anino-plásticos, poliuretanos e isocianatos, sendo a aplicação destes para uso externo. Na norma NBR 7190:2022 e na norma DIN 64 140:1971, apenas é indicado que os adesivos devam ser resistentes às intemperes que forem previstas em projeto, devendo ser garantido pelo fabricante do adesivo.

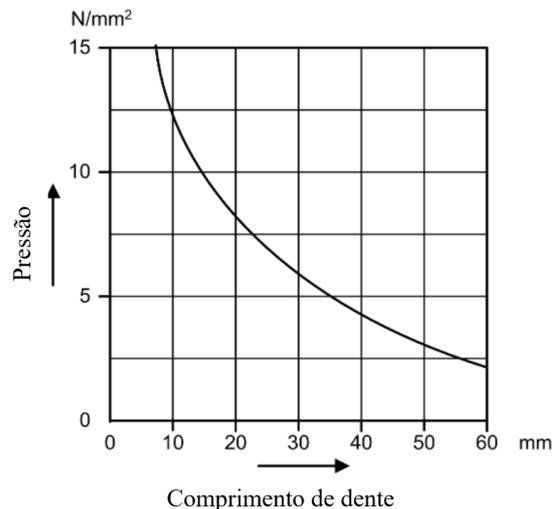
A umidade interna nos substratos deverá ser uniforme, de acordo com as três normativas (DIN 64 140, NBR 7190) (Quadro 1), sendo que há um consenso entre elas, de que a variação de umidade entre as peças não exceda 5%.

2.3.2.1. Tempo e pressão de colagem

As normativas DIN 64 140:1971 e NBR 7190:2022 são diretrizes técnicas amplamente reconhecidas que fornecem orientações específicas sobre os valores recomendados para a pressão de colagem das emendas dentadas em madeiras. A DIN 64 140:1971 aborda a pressão de colagem com base nas classes de madeira, distinguindo entre coníferas (madeiras de coníferas, como pinheiro e abeto) e folhosas (madeiras de folhosas, como carvalho e mogno). Por outro lado, a NBR 7190:2022 considera a densidade da madeira como critério para determinar os valores de pressão de colagem adequados. Ambas as normativas visam garantir a qualidade e a resistência das emendas dentadas, fornecendo diretrizes para os profissionais da área.

As normativas EN 15497:2014, DIN 64 140:1971 e NBR 7190:2022 são referências importantes quando se trata de determinar as pressões adequadas para emendas dentadas. Embora a norma EN 15497:2014 leve em consideração apenas o comprimento de dente (conforme ilustrado na Figura 9), as pressões indicadas nas três normativas apresentam faixas semelhantes. No entanto, é importante observar que a norma EN 15497:2014 menciona explicitamente que outros fatores, como espécie da madeira, densidade e condições de colagem, podem influenciar na pressão adotada. No entanto, ao contrário das normativas DIN 64 140:1971 e NBR 7190:2022, a EN 15497:2014 não sugere valores específicos que considerem esses fatores adicionais. Portanto, ao utilizar essa norma, é fundamental avaliar cuidadosamente esses aspectos para determinar a pressão adequada para as emendas dentadas.

Figura 9 – Pressões de colagem, segunda EN 15497.



Fonte: EN 15497 (2014).

O acréscimo de pressão de colagem para as madeiras de folhosas, observado nas normas DIN 64 140 e NBR 7190, deve-se ao fato de que, em geral, as espécies desta classe apresentam maior densidade, o que oferece maior resistência à penetração dos adesivos na superfície. A redução de pressão, em função do aumento do comprimento do dente, é atribuída à susceptibilidade de fissuras na região da base do dente. Essa última diferenciação de pressões em função do comprimento de dente também é observada na normativa EN 15497.

O tempo de permanência da pressão aplicada para união das emendas dentadas é um consenso entre as normas DIN 64 140 e NBR 7190, sendo sugerido o tempo de, pelo menos, 2 segundos. Ambas as normas não apresentam critérios para uma possível variação de tempo, em função de diferentes parâmetros, tais como geometria de dente e condições climáticas de

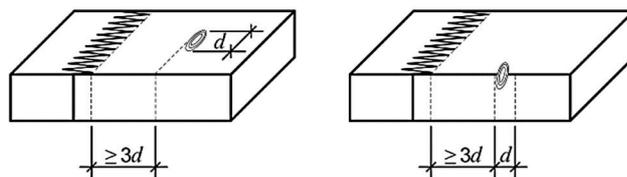
colagem. A norma EN 15497 também não vai além em critérios para tempo de colagem, porém sugere uma sutil variação no tempo mínimo de prensagem em função da espessura da peça a ser unida pela emenda dentada (espessura menor que 45 mm, tempo de 1 s; espessura > 45 mm, tempo de 2 s).

2.3.2.2. Geometria de dente

Quanto a questões de geometria de dente, as três normativas EN 15497, DIN 64 140 e NBR 7190 apresentam dimensões distintas, tendo como única similaridade o limite superior do comprimento de dente de 60 mm. Já para o limite inferior, para fins estruturais, a norma DIN 64 140 é mais flexível em relação às demais, permitindo o comprimento de dente de 7,5 mm, enquanto as normas EN 15497 e NBR 7190 sugerem os valores de 10 mm e de 15 mm, respectivamente. A NBR 7190:2022 fornece parâmetros geométricos para as emendas dentadas no comprimento de dente (10 até 60 mm), inclinação dos flancos (entre 5° e 7°) e espessura de dente (5% comprimento do dente). Para p e b_t , a norma EN 15497 sugere valores dentro de um intervalo menor que a DIN 64 140, entre 3,6 mm e 6,2 mm e entre 0,42 mm e 1 mm, respectivamente. Para o passo p , a norma alemã recomenda um intervalo entre 2,5 mm e 15 mm, enquanto para b_t , o intervalo indicado é entre 0,2 mm e 2,7 mm. Essas diferenças nas faixas de valores refletem as abordagens distintas adotadas pelas normas no que diz respeito às dimensões das emendas dentadas.

Especificações quanto à presença de nós e de defeitos na emenda dentada e na região em torno da mesma também são tratados pelas normas DIN 64 140 e EN 15497, mas o mesmo quesito não foi abordado na norma NBR 7190. Informações como estas são de extrema importância ao que compete o uso estrutural da emenda. Por exemplo, não poderá haver nós na área de colagem da emenda e nem a uma distância inferior ao indicado (Figura 10) para a EN 15497 e 100 mm para DIN 64 140.

Figura 10 – Distância mínima entre emendas dentadas e nós EN 15497.



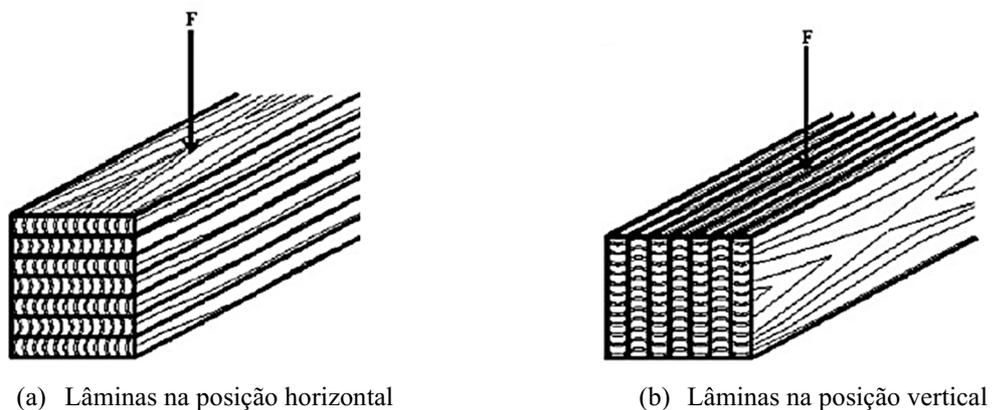
Fonte: EN 15497 (2014).

2.4. VIGAS EM LVL

2.4.1. Fabricação

As chapas de LVL são frequentemente utilizadas para compor vigas estruturais, sendo confeccionadas comumente nos perfis retangulares e nos flanges e/ou almas de perfis I (DE LÁRA SANTOS et al., 2009). Para as vigas de perfis retangulares, as chapas madres de LVL podem ser coladas face-a-face para atingir as dimensões desejadas, ou ainda ser realizada a colagem do número de lâminas suficientes para obter as dimensões solicitadas. Quanto à utilização das vigas de LVL, as lâminas podem estar dispostas nas posições horizontal (*flatwise*) (Figura 11-a) e vertical (*edgewise*) (Figura 11-b), em função da direção de aplicação da carga.

Figura 11 – Vigas retangular vertical e horizontal em LVL.

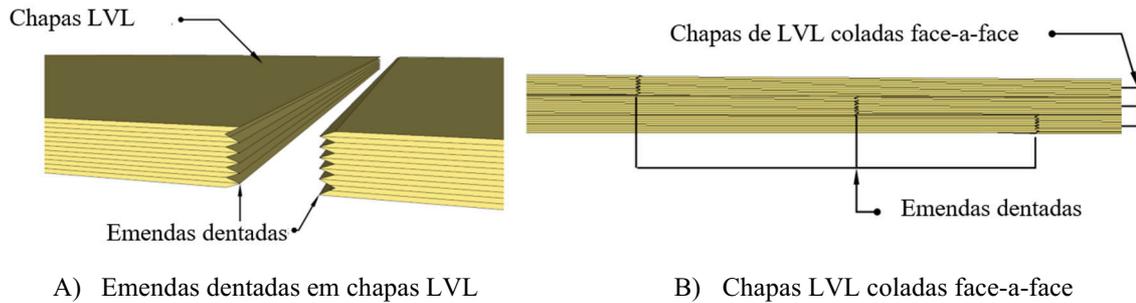


Fonte: Burdurlu et al. (2007).

As posições *edgewise* e *flatwise*, conforme Molina et al., (2013), Nogueira (2017) & Palma et al., (2011), não apresentam variações estatisticamente significativas quanto aos módulos de elasticidade (E) e de ruptura (f), para o ensaio de flexão a quatro pontos. Na posição *flatwise*, em um processo de produção com disposição de lâminas de forma aleatória, as lâminas localizadas como capa e contracapa da viga podem apresentar falhas ou rachas, por questões de qualidade, que podem comprometer significativamente o desempenho do elemento estrutural, em função dos esforços de tração e de compressão nas lâminas externas da viga (PALMA et al., 2011).

Para que as vigas em LVL vençam grandes vãos é necessário que as chapas sejam emendadas longitudinalmente. As emendas estruturais convencionais para chapas em LVL, conforme Nogueira (2017), são as emendas biseladas e dentadas (horizontais e verticais), sendo que ambas possuem boa eficiência para aplicação industrial.

Figura 12 – Emenda dentada em chapa madre de LVL.



Fonte: autor (2023).

2.4.2. Normas para avaliação mecânica de vigas em LVL

As normativas para avaliação de vigas estruturais em LVL para diferentes países, assim como para as emendas dentadas, apresentam variações. Neste subtópico, serão abordados os requisitos para o ensaio de flexão a quatro pontos (Quadro 2), segundo as normas americana (ASTM D198, 2015), europeia (EN 408, 1995) e a normativa internacional (ISO 13910, 2014). O esquema para o ensaio de flexão a quatro pontos está indicado na Figura 15.

Quadro 2 – Parâmetros para flexão a quatro pontos.

	ASTM D198-2015	EN 408-1995	ISO 13910-2014
Velocidade ensaio	-	$0.003h \text{ mm/s}$	-
Tempo para a carga máxima	$\pm 240 \text{ s}$	$300 \pm 120 \text{ s}$	$60-300 \text{ s}$
Vão entre apoios	$0,4 \text{ até } 0,6 * \left(\frac{f}{\tau}\right)$	$18h$	$15-20h$
Módulo de elasticidade na flexão	$\frac{F_{max}l}{bh^2}$	$\frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16l(w_2 - w_1)}$	$\frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16l(w_2 - w_1)} * (3L^2 - 4a^2)$
Módulo de ruptura	$\frac{23Fl^3}{108bh^3(w_2 - w_1)}$	$\frac{aF_{max}}{2W}$	$\frac{3aF_{max}}{bh^2}$

Onde: f – ruptura; W – módulo resistente da seção; w – deslocamento; h – altura; b – base; a – distância entre ponto de aplicação de carga e o apoio mais próximo; F – força; L – comprimento teórico da peça; l – Vão entre os apoios; I – segundo momento de inércia.

Para as três normas apresentadas no Quadro 2, apenas a norma EN 408:1995 sugere que a velocidade da aplicação da carga no ensaio seja em função da altura do corpo de prova. O tempo para que o ensaio atinja a carga máxima é presente nas três normativas, sendo a norma ISO 13910 a mais abrangente destas, indicando que o tempo total de ensaio deverá estar no intervalo de 1 a 5 min.

O vão estimado entre os apoios do ensaio de flexão a quatro pontos é sugerido em função da altura dos corpos de prova, para as normas EN 408:1995 e ISO 13910:2014. Já para a norma ASTM D198:2015, esta medida é estimada em função do objetivo do ensaio. Para avaliação das propriedades a flexão (E e f), a ASTM D198:2015 sugere uma relação entre o módulo de ruptura e a tensão de cisalhamento média, ainda sugerindo que o vão de cisalhamento (entre o apoio e aplicação de carga) seja relativamente grande, a fim de minimizar os efeitos do cisalhamento no ensaio.

A avaliação dos resultados nos ensaios mecânicos de flexão a quatro pontos, para as normativas ASTM D198:2015, EN 408:1995 e ISO 13910:2014, se dá através dos valores para os módulos de elasticidade e de ruptura. A fim de minimizar os efeitos de cisalhamento no trecho entre o apoio e a aplicação de carga, as normativas ASTM D198:2015 e ISO 13910:2014 recomendam que este trecho se situe dentro do intervalo de 4,5 até 7 vezes a altura da viga. Já a norma EN 408:1995 não apresenta a ressalva referente ao cisalhamento em flexão, porém ela fixa o valor de 6 vezes a altura para este vão, estando em conformidade com as normas ASTM D198:2015 e ISO 13910:2014.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

Para a fabricação das chapas de LVL, foram usadas madeiras da espécie de *Pinus taeda*, sendo esta madeira provinda de maciços florestais localizados em Santa Catarina e norte do Rio Grande do Sul, com idades entre 12 e 20 anos. As características físicas e mecânicas da espécie de *Pinus taeda* recebidas na empresa são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus taeda*.

Ensaio	Propriedade	Média
Umidade (%)	Teor de umidade - TU	17
Massa específica a 12% de TU (kg/m ³)	Massa específica aparente	483
Estabilidade (%)	Retração radial	4,2
	Retração tangencial	5,16
	Inchamento radial	4,39
	Inchamento tangencial	5,45
	Variação volumétrica	9,13
Compressão paralela às fibras (MPa)	Tensão máxima	32
Compressão perpendicular às fibras (MPa)	Tensão máxima	10
Dureza (MPa)	Axial	210
	Tangencial	319
	Radial	228
Fendilhamento (MPa)	Resistência ao fendilhamento	0,3

Com o beneficiamento das toras de madeira em lâmina de espessura média de 1,5 mm, o processo de fabricação dos painéis LVL segue com a secagem e classificação visual das lâminas. Posteriormente, são formados colchões de lâminas com linhas entre cola entre elas. A cola utilizada é a base de fenol-formaldeído, com densidade aproximada de 1,35 g.cm⁻³, utilizando como extensores da resina um total entre 50 e 70% de água e 70 a 90% de trigo do tipo 2B misturado sobre a proporção da mistura, apresentando um teor de sólidos entre 36 e 38% de sólidos totais e pH variando entre 11 e 13. A gramatura utilizada na colagem das lâminas de madeira para formação do painel LVL corresponde de 320 a 410 g.m⁻². A pressão de colagem aplicada sobre as lâminas é de aproximadamente 1,27 MPa.

3.2. AMOSTRAS

Para a avaliação da influência das emendas dentadas na resistência mecânica das vigas em LVL, o plano experimental propõe a separação das amostras em dois grupos distintos, em função do número de chapas justapostas (2 e 3) coladas para a formação da viga (Quadro 4). Cada grupo destes conta com cinco tratamentos que se darão em função do transpasse entre emendas dentadas em chapas adjacentes. Cada tratamento é composto por cinco réplicas (Quadro 3), para cada grupo (V2 e V3), sendo eles:

C - Tratamento controle (viga sem emendas dentadas);

M - Tratamento viga com a emenda dentada única ao centro do vão (atualmente realizada pela empresa Ekomposit);

200 - Tratamento viga com emendas dentadas dispersas com transpasse de 200 mm;

600 - Tratamento viga com emendas dentadas dispersas com transpasse de 600 mm;

Quadro 4 – Plano experimental proposto.

	Amostras	b (mm)	h (mm)	L (mm)	Transpasse (mm)	Total Corpo de Prova
V2	V2-C	76	100	2000	-	5
	V2-M				ao centro	5
	V2-200				200	5
	V2-600				600	5
V3	V3-C	114			-	5
	V3-M				ao centro	5
	V3-200				200	5
	V3-600				600	5

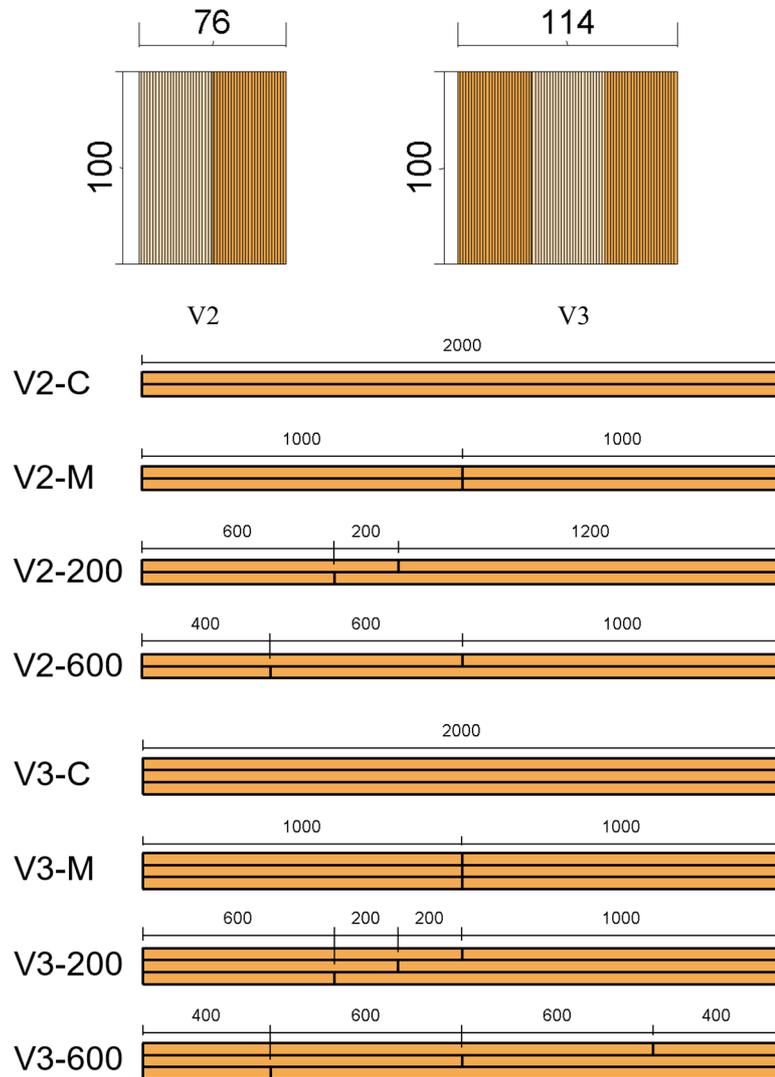
Onde: b – largura da viga; h – altura da viga e L – comprimento da viga.

Os prefixos V2 e V3 indicam vigas formadas pela colagem de 2 e 3 chapas, respectivamente. Os sufixos C, M, 200-600 referem-se ao controle, viga com emenda única ao centro e diferentes transpasses de emendas dentadas, respectivamente.

3.3. CORPOS DE PROVA

As vigas possuem 2000 mm de comprimento e foram classificadas em 2 grupos: V2 e V3. Elas são formadas por colagem de duas e três chapas de LVL, respectivamente (Figura 13).

Figura 13 – Seção transversal das vigas e posicionamento das emendas dentadas (vista superior).



Fonte: autor (2023).

A fabricação das vigas em LVL ocorre, primeiramente, pela usinagem das emendas dentadas nos painéis LVL (Figuras 14-A e 14-B), para a emenda longitudinal das chapas madre de dimensões comerciais (38 mm × 1220 mm × 2440 mm). As emendas dentadas foram coladas com adesivo polivinílico, com gramatura de 180 a 200 g.m⁻² e pressão de colagem de 5 MPa (Figura 14).

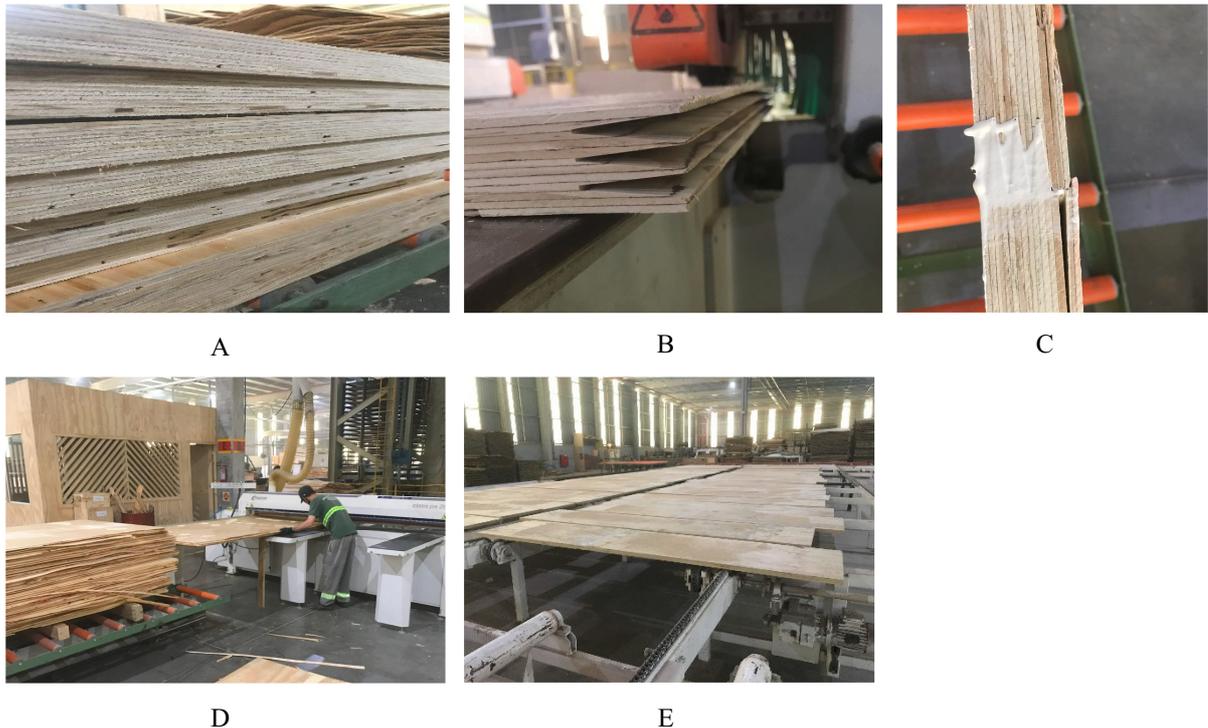
As dimensões dos elementos que compõem as emendas dentadas, como comprimento de dente (lf), passo de dente (p), espessura da ponta de dente (bt) e folga (e), estão listadas no Quadro 5. Estas dimensões são utilizadas para a emenda longitudinal das chapas madre.

Quadro 5 – Parâmetros para emenda dentada - Ekomposit

Parâmetros	Dimensões (mm)
l_f	35
p	7,5
b_t	1.3
e	1,5

As chapas foram desdobradas na largura, em peças de 100 mm (Figura 14-D). Com as peças nas dimensões de 38 mm × 100 mm × 2440 mm, passou-se à colagem de face das peças (Figura 14-E), as quais foram posicionadas de tal forma que as emendas dentadas que uniram as chapas madres fossem transpassadas de acordo com o plano experimental. Foram confeccionadas vigas com colagem de face de 2 e 3 chapas (Figura 13).

Figura 14 – Usinagem e colagem das emendas dentadas nos painéis LVL.



Fonte: autor (2023).

Para caracterização mecânica das vigas em LVL, bem como realizar a verificação da influência das emendas dentadas na resistência das mesmas, segundo a norma EN 15497 (*Finger jointed structural timber – Performance requirements and minimum production requirements*), os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de flexão a quatro pontos. As

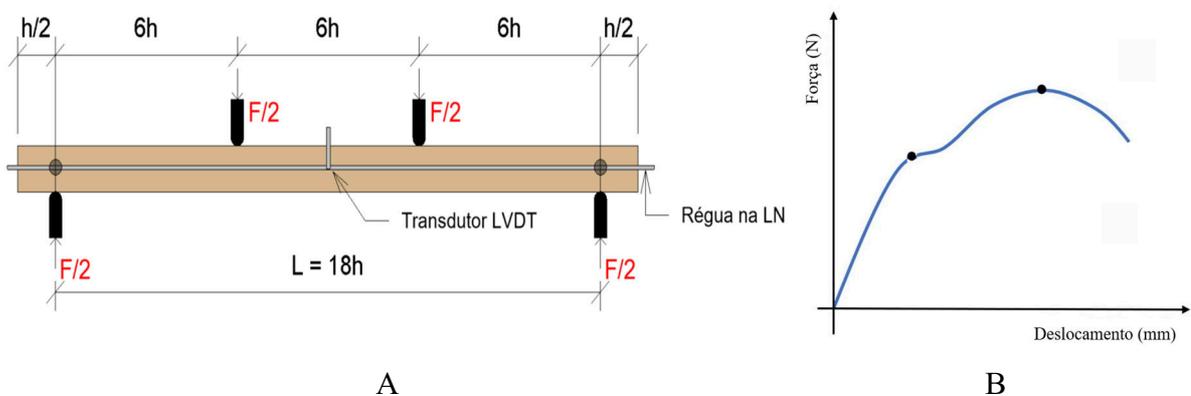
dimensões adotadas para os corpos de prova (Figura 15) estavam de acordo com a norma EN 408 (1995).

3.4. ENSAIO DE FLEXÃO A QUATRO PONTOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Experimentação em Estruturas, vinculado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Foi utilizado um pórtico metálico instalado em uma laje de reação de $10\text{ m} \times 10\text{ m}$, com um atuador hidráulico acoplado à uma célula de carga de 50 kN , com velocidade média de avanço do carregamento de aproximadamente de $0,3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Os deslocamentos foram medidos por transdutores de deslocamento variável linear (LVDT) com saída digital, do tipo induzido com extensão por força, recomendado para aplicações de movimentação lenta. Os transdutores foram instalados nas 2 faces laterais do vão central da viga.

Figura 15 – Ensaio de flexão a quatro pontos nas amostras de LVL com emendas dentadas.

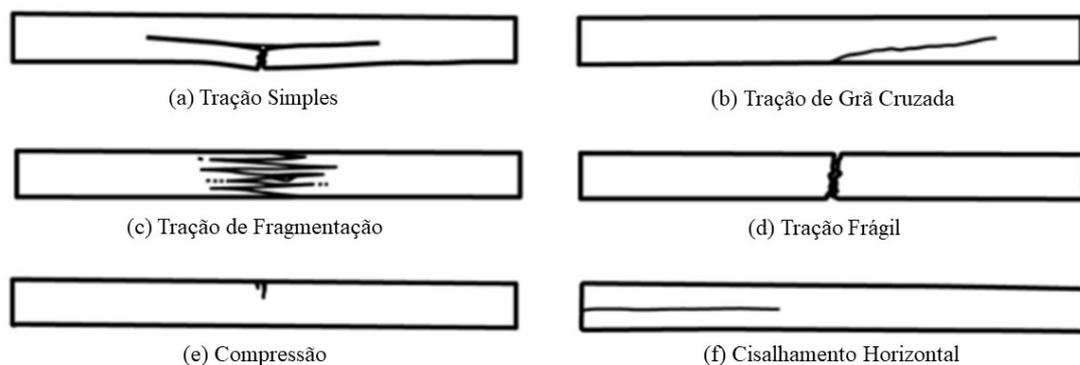


Fonte: autor (2023).

3.5. MODOS DE FALHA

Para determinação do modo de falha das vigas submetidas ao ensaio de flexão a 4 pontos, as amostras foram classificadas conforme a aparência da superfície fraturada (Figura 16).

Figura 16 – Modos de falhas no ensaio de flexão estática.



Fonte: Adaptado de ASTM D143.

Ainda, o modo de falha foi avaliado visualmente e atribuído aproximadamente a um dos seguintes tipos:

Modo I - a fratura ocorre 100% pelo painel de LVL;

Modo II - a fratura ocorre parcialmente pela emenda dentada e parcialmente pelo adesivo;

Modo III - a falha ocorre 100% por adesivo.

Modo IV - a falha ocorre 100% pela emenda dentada.

3.6. DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NA FLEXÃO (MOE)

A determinação do módulo de elasticidade na flexão (MOE) foi feita pela Equação (1), a partir das curvas força × deslocamento obtidas no ensaio de flexão a 4 pontos. Este parâmetro é uma medida da rigidez de um material e representa a capacidade de uma peça, resistir à deformação quando submetida a uma carga aplicada.

$$E_m = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)}, \quad (1)$$

onde: a = distância entre uma posição de carregamento e o suporte mais próximo em um teste de flexão; l_1 = comprimento de referência para a determinação do E local; I = o segundo momento de inércia; $F_2 - F_1$ = o incremento da carga na linha de regressão com um coeficiente de correlação de 0,99 ou melhor; $w_2 - w_1$ = o incremento da deflexão local correspondente a $F_2 - F_1$.

3.7. DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA (MOR)

Assim como para o módulo de elasticidade, o ensaio de flexão estática até a ruptura forneceu condições para o cálculo do módulo de ruptura (f) (Equação 2), que é compreendido como a resistência máxima de deformação antes de ocorrer a ruptura da peça.

$$f_m = \frac{aF_{max}}{2W}, \quad (2)$$

onde: a = distância entre uma posição de carregamento e o suporte mais próximo em um teste de flexão; F_{max} = força máxima obtida no ensaio e W = módulo resistente da seção.

3.8. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Para avaliação da influência dos transpasses das emendas dentadas verticais no desempenho mecânico das ligações, as médias de MOE e de MOR para cada tratamento foram comparadas.

Inicialmente, a verificação da normalidade e da homogeneidade dos dados das amostras foi realizada por meio dos testes de White e Shapiro-Wilk (SHAPIRO, 1965; WHITE, 1980). Uma vez conformes, os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste de Welch (WELCH, 1951) com confiabilidade de 90% e o teste de *post-hoc* de Games-Howell (GAMES; HOWELL, 1976), para realizar comparações múltiplas entre grupos quando não se pode assumir igualdade de variâncias e/ou tamanhos de amostra desiguais. A análise de variância foi realizada separadamente para cada um dos grupos V2 e V3. A análise estatística foi realizada através do *software* OriginLab Corporation[©].

4. RESULTADO E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios mecânicos realizados e da análise de rigidez e resistência das vigas estudadas.

4.1. MASSA ESPECÍFICA APARENTE

Os valores de massa específica aparente encontrados se mantiveram consistentes e próximos uns dos outros (Tabela 1). Isso indica uma uniformidade na composição dos painéis LVL fabricados, bem como na aplicação do adesivo durante o processo de laminação (MOLINA *et al.*, 2013). A maior variação nas massas específicas se apresentou entre os tratamentos V2-C e V3-600, podendo ser atribuída a fatores como a qualidade das lâminas de madeira utilizadas e a variabilidades no controle do processo de fabricação.

Tabela 1 – Massa específica aparente para os tratamentos.

Grupo	Tratamento	Nº Amostras	Massa específica $\rho_{12\%}$	Desvio Padrão	Coeficiente Variação
		<i>un</i>	$kg.m^{-3}$		
V2	V2-C	8	510,2	13,0	2,6
	V2-M	5	526,1	10,3	2,0
	V2-200	2	524,9	9,6	1,8
	V2-600	5	529,2	15,9	3,0
V3	V3-C	4	515,7	11,1	2,2
	V3-M	5	528,8	13,4	2,5
	V3-200	4	530,6	7,6	1,4
	V3-600	5	537,0	11,4	2,1

Conforme Nogueira (2017), a massa específica de painéis LVL fabricados com espécies de madeira do grupo das coníferas, pode variar entre 490-600 $kg.m^{-3}$.

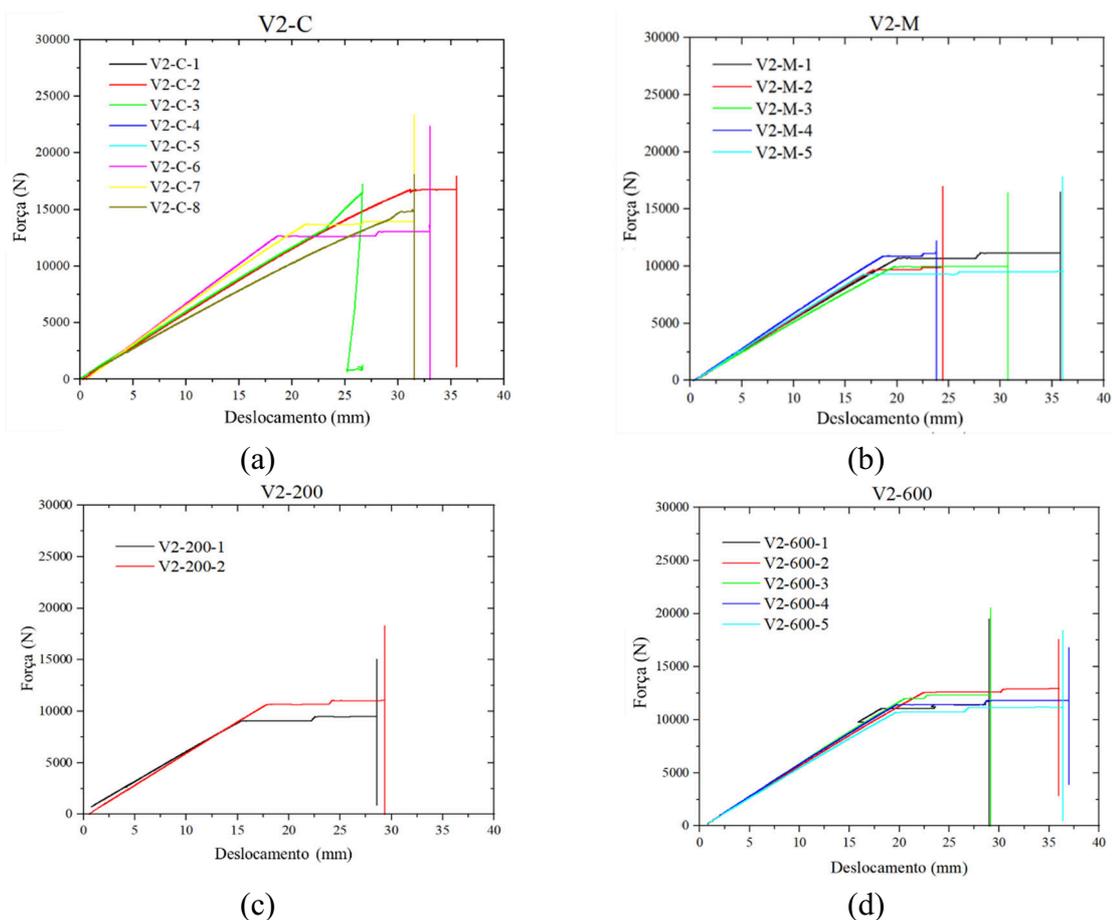
4.2. CURVAS FORÇA × DESLOCAMENTO

Finalizado o plano experimental para as amostras das vigas em LVL e para os ensaios, ele foi encaminhado a empresa Ekomposit[®], a qual disponibilizou um número de amostras

divergente do plano proposto, logo, o número de amostras por tratamento passou a ser heterogêneo.

Nas figuras 17a-d e 18a-d, são apresentadas as curvas força \times deslocamento das amostras V2 e V3 ao meio do vão, respectivamente. O número de corpos de prova difere entre os tratamentos apresentados, pois ocorreram problemas de fabricação das vigas na empresa fornecedora, os quais não foram possíveis de serem contornados, resultando em um número de corpos de prova não homogêneo e uma redução de amostras para o tratamento V2-200.

Figura 17 – Curvas força \times deslocamento das amostras do grupo V2.

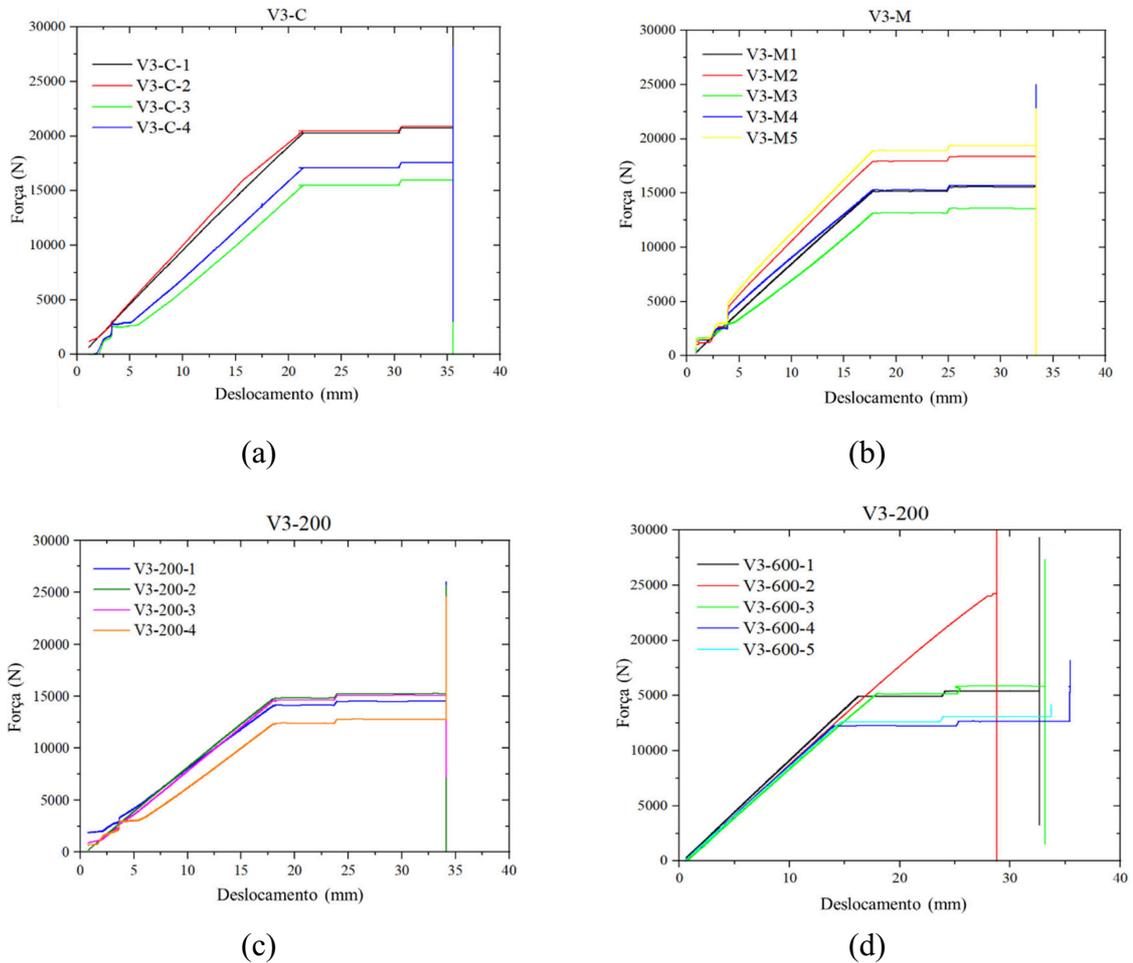


Fonte: Autor (2023).

Observa-se que o comportamento inicial das curvas das amostras V2 e V3 é linear, indicando uma rigidez constante durante a fase inicial de aplicação de carga, sendo que as curvas força \times deslocamento do grupo V3 apresentam uma tendência maior à dispersão dentro de cada tratamento, o que não acontece no comportamento das curvas do grupo V2. É possível notar que, em ambos os grupos analisados, as amostras controle (V2-C e V3-C) apresentaram

uma força máxima de ruptura superior aos das vigas que possuíam emendas dentadas, como era já esperado.

Figura 18 – Curvas força × deslocamento das amostras do grupo V3.



Fonte: Autor (2023).

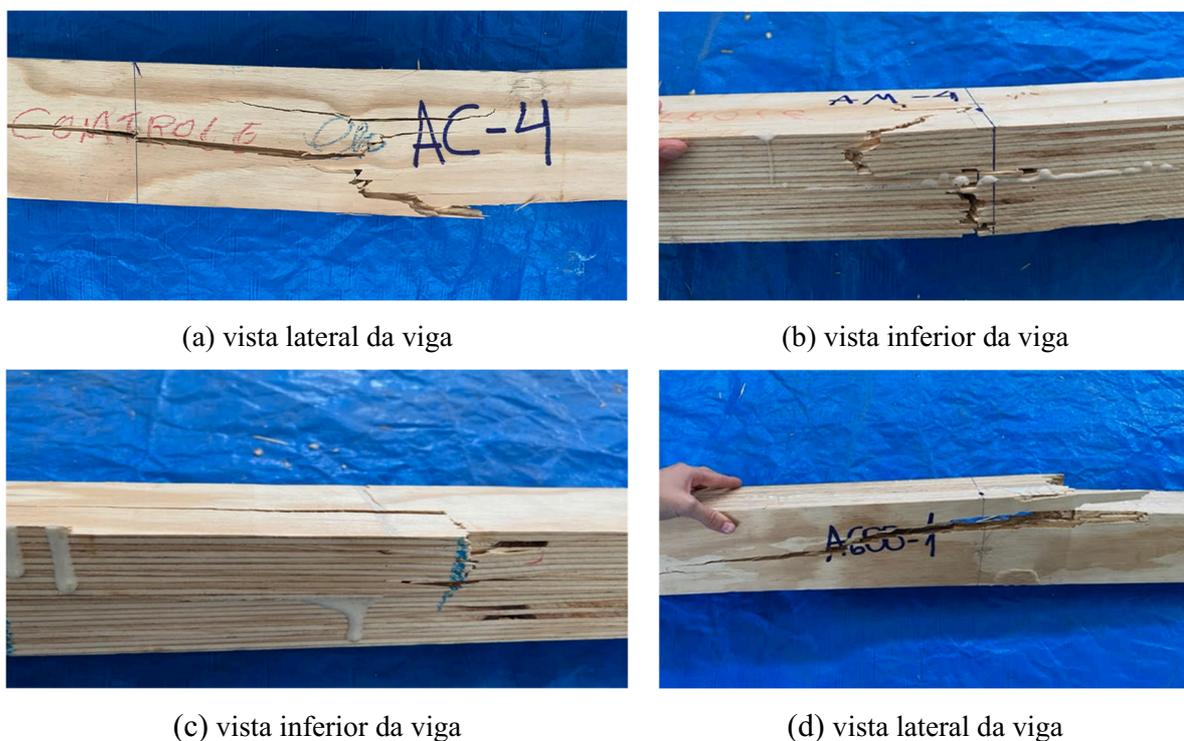
Por meio da análise das curvas força × deslocamento obtidas durante os ensaios, foi possível obter informações relevantes sobre o desempenho estrutural das vigas de LVL. Essas curvas permitem identificar pontos críticos, tais como a rigidez estrutural, a resistência máxima e o ponto de ruptura do material.

4.3. MODOS DE FALHAS

Durante o ensaio de flexão estática a quatro pontos, foram identificados e registrados e 3 tipos de modos de falhas: tipos I, II e IV (Tabela 2). Nas vigas controles dos grupos V2 e V3, por não haver emendas dentadas, todas as falhas ocorreram 100% painel LVL,

apresentando uma tendência ao modo de falha de tração simples, com a linha de falha localizada próximo ao centro do vão, onde o momento fletor é máximo, propagando-se para cima até formar uma trinca horizontal ao longo do comprimento da viga (figuras 19a e 20a). De acordo com Musselman *et al.* (2018), a formação da trinca horizontal ocorre após a ruptura das fibras tracionadas, liberando estas fibras para voltarem ao seu comprimento inicial, enquanto a região comprimida ainda permanece sob tensão. Esta diferença de tensões normais gera um cisalhamento longitudinal na viga, o qual a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira é incapaz de absorver, formando-se assim a trinca horizontal.

Figura 19 – Modos de falhas para o grupo V2.



Onde: A – Controle; B – Tratamento V2-M; C – Tratamento V2-200; D – Tratamento V2-600;

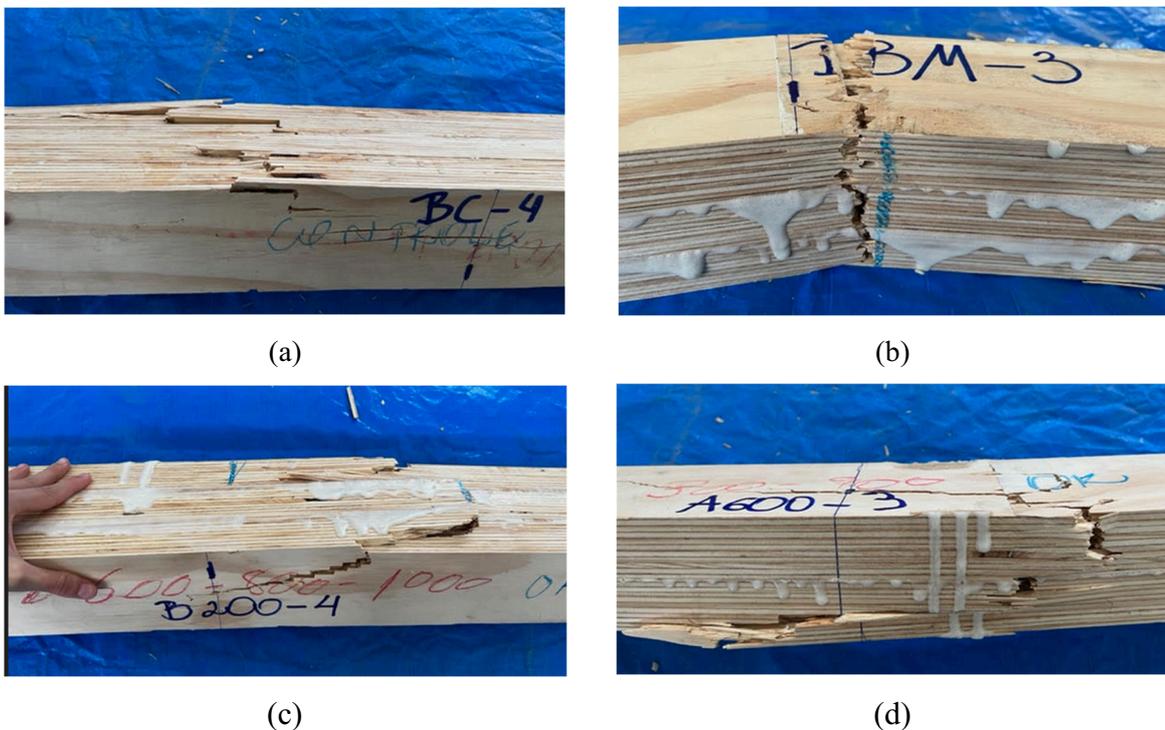
Fonte: autor (2023).

Para os tratamentos V2-M e V3-M, onde as emendas dentadas são posicionadas no centro do vão, ambas apresentaram majoritariamente ruptura abrupta na emenda dentada (Modo IV). Este comportamento é característico de uma ruptura frágil em cascata (figuras 19-B e 20-B), esperado para este tratamento, visto que, de acordo com Tran *et al.* (2014), a emenda dentada é considerada um elo fraco em vigas de madeira, isto se torna mais evidente para os

tratamentos V2-M e V3-M, os quais possuem emendas dentadas na região onde o momento fletor é máximo, e em toda área de seção transversal.

Na avaliação dos modos de falhas dos tratamentos V2-200, V2-600, V3-200 e V3-600, observou-se que as diferentes distâncias entre as emendas dentadas apresentam efeitos distintos na distribuição das falhas nas vigas. Para as vigas com transpasse de 200 mm entre emendas dentadas, nota-se que a falha ocorreu inicialmente na base da emenda (Modo VI) e progrediu para falha no painel (Modo I), originando uma trinca, por cisalhamento longitudinal, que se propagou até a emenda adjacente, apresentando uma ruptura frágil.

Figura 20 – Modos de falhas para o grupo V3.



Onde: A – Controle; B – Tratamento V3-M; C – Tratamento V3-200; D – Tratamento V3-600;

Fonte: autor (2023).

Nas vigas dos tratamentos com transpasse de 600 mm (V2-600 e V3-600), observou-se uma maior propagação da trinca longitudinal em relação as vigas com transpasse de 200 mm, o que se deve ao maior espaçamento entre as emendas dentadas. Ainda, com uma maior distância entre as emendas, as tensões nas mesmas se diluem ao longo da viga (IŞLEYEN, 2020), resultando em uma maior contribuição do LVL para as falhas das vigas destes tratamentos.

Tabela 2 – Classificação e distribuição dos modos de falhas das vigas de LVL.

Grupo	Tratamento	Modo I	Modo II	Modo III	Modo IV
V2	C	100%	-	-	-
	M	20%	10%	-	70%
	200	12%	-	-	88%
	600	32%	8%	-	60%
V3	C	100%	-	-	-
	M	-	13%	-	87%
	200	10%	-	-	90%
	600	47%	-	-	53%

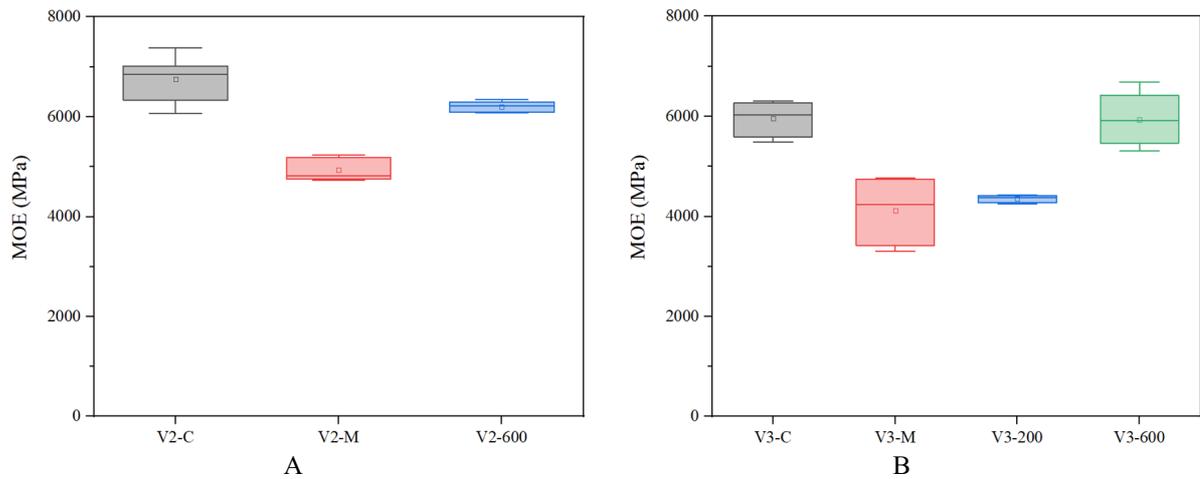
Entre todas as amostras ensaiadas, para os diferentes tratamentos e grupos, nenhuma apresentou falha 100% no adesivo da emenda dentada (Modo III), indicando a efetividade do processo de colagem das emendas (Tabela 2).

4.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE NA FLEXÃO (MOE)

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk para os dados do MOE, dos grupos V2 e V3 não descartou a normalidade dos dados para significância de 10%, com exceção do tratamento V2-200 que não possuía o número mínimo de três amostras estipulado pelo teste e este não foi levado em conta nas análises estatísticas (ANEXO I e II). O gráfico de caixa para o teste de Shapiro-Wilk (Figura 21) para os tratamentos dos grupos V2 e V3, em relação ao MOE, não apresentou valores discrepantes (*outliers*) aos limites inferior e superior em todos os tratamentos.

Para a comparação de médias dos tratamentos dos grupos V2 e V3, a ANOVA de Welch foi realizada, para o nível de significância de 10%, a qual indicou que houve diferença estatisticamente significativa nos grupos V2 (valor- $p = 3,71 \times 10^{-6}$) e V3 (valor- $p = 4,01 \times 10^{-4}$) (ANEXO I e II).

Figura 21 - Gráfico de caixa para o teste de Shapiro-Wilk do MOE.



Onde: A – Tratamentos do Grupos V2; B – Tratamentos do Grupos V3.

Fonte: autor (2023).

Os módulos de elasticidade na flexão (MOE) obtidos para os vários tratamentos são apresentados na Tabela 3. O tratamento de controle do grupo V2 (sem emendas) apresentou MOE médio igual a 6755 ± 555 MPa. Observou-se um elevado coeficiente de variação na maior parte dos tratamentos, em especial para os tratamentos V3-C e V3-M, indicando a necessidade de um controle rigoroso do processo de fabricação das vigas de LVL, bem como a necessidade de considerar cuidadosamente os parâmetros de qualidade das matérias-primas, tais como densidade, retratibilidade, rigidez, e os procedimentos de laminação.

Tabela 3 – Valores do módulo de elasticidade (MOE) obtidos para os grupos V2 e V3.

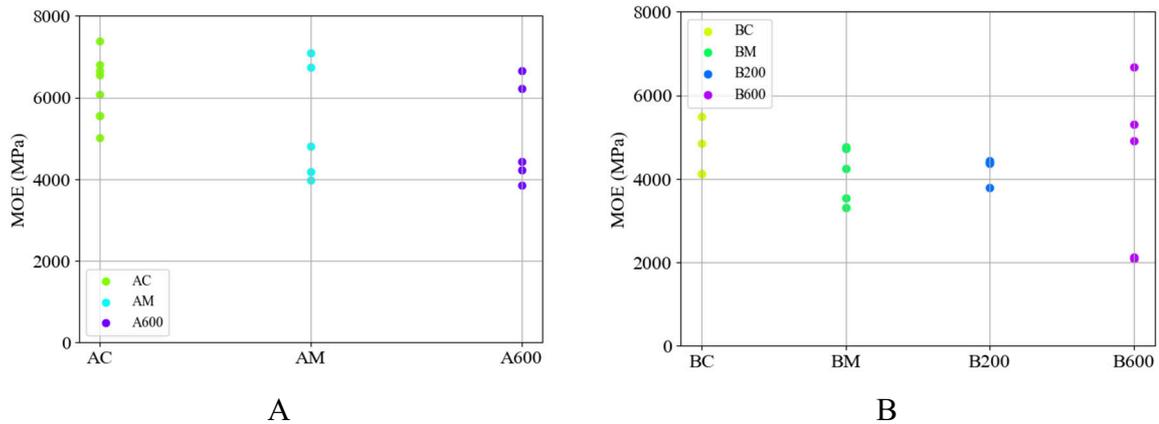
Grupo	Tratamento	MOE Médio	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
		MPa	MPa	%
V2	V2-C	6760	550	8,2
	V2-M	4940	260	5,4
	V2-200	5430	250	4,6
	V2-600	6210	110	1,8
V3	V3-C	5960	1040	17,4
	V3-M	4110	660	16,0
	V3-200	4360	760	1,7
	V3-600	5940	570	8,9

Os tratamentos controles V2-C e V3-C apresentaram MOE médios de 6755 ± 555 MPa e 5961 ± 1035 MPa, respectivamente.

Aqui, observou-se ainda, que os valores de rigidez médios tendem a aumentar, à medida que o transpasse entre as emendas dentadas aumentava (Figura 21). Os tratamentos V2-200 e V3-200, com transpasse de 200 mm entre as emendas dentadas, apresentaram decréscimo de 19,62% e 17,15%, respectivamente, em relação ao valor ao MOE dos seus respectivos tratamentos controle (V2-C e V3-C). Já para os tratamentos V2-600 e V3-600, com transpasse de 600 mm entre as emendas dentadas, apresentaram um decréscimo de 7,91% e 1,2%, respectivamente, em relação MOE médio do tratamento controle de cada grupo (V2-C e V3-C). Nota-se que as emendas dentadas com transpasse de 200 mm nos grupos V2 e V3 apresentaram uma redução de rigidez relativamente similar. No entanto, quando o transpasse foi aumentado para 600 mm, a redução do módulo de elasticidade (MOE) não se mostrou convergente entre os grupos. Esses resultados sugerem que o transpasse das emendas dentadas pode influenciar de forma significativa a rigidez das vigas de madeira, porém, diferentemente do grupo V2, onde 50% da seção transversal era emenda dentada. Já no grupo V3, a emenda dentada representava apenas 33,33% da área da seção, comprometendo uma menor parcela da seção resistente da viga na região da emenda.

Para ambos os grupos avaliados, V2 e V3, os tratamentos que possuíam uma única emenda ao centro do vão apresentaram os menores valores de rigidez, 4941 ± 264 MPa e 4114 ± 655 MPa, respectivamente. A redução média no MOE do tratamento controle para o tratamento com emenda dentada única ao centro do vão (realizado na linha de produção da empresa Ekomposit[®]) foi de 26,85% e 19,65%, para os grupos V2 e V3, respectivamente. De acordo com Lamb-Shine & Wands (1982), a presença de uma emenda dentada no centro do vão, em uma viga de madeira, resulta em uma redução média de rigidez de aproximadamente 20%, em comparação com uma viga de madeira sem emenda dentada. Essa redução significativa na rigidez pode ser atribuída à descontinuidade introduzida pela emenda dentada. Com isto, a distribuição de tensões ao longo da viga durante a aplicação das cargas é afetada, sendo que à medida que esta descontinuidade é transpassada, a viga apresentou um aumento de rigidez (Figura 21).

Figura 22 – MOE dos tratamentos dos grupos V2 e V3.



Onde: A – Tratamentos do Grupos V2; B – Tratamentos do Grupos V3.

Fonte: autor (2023).

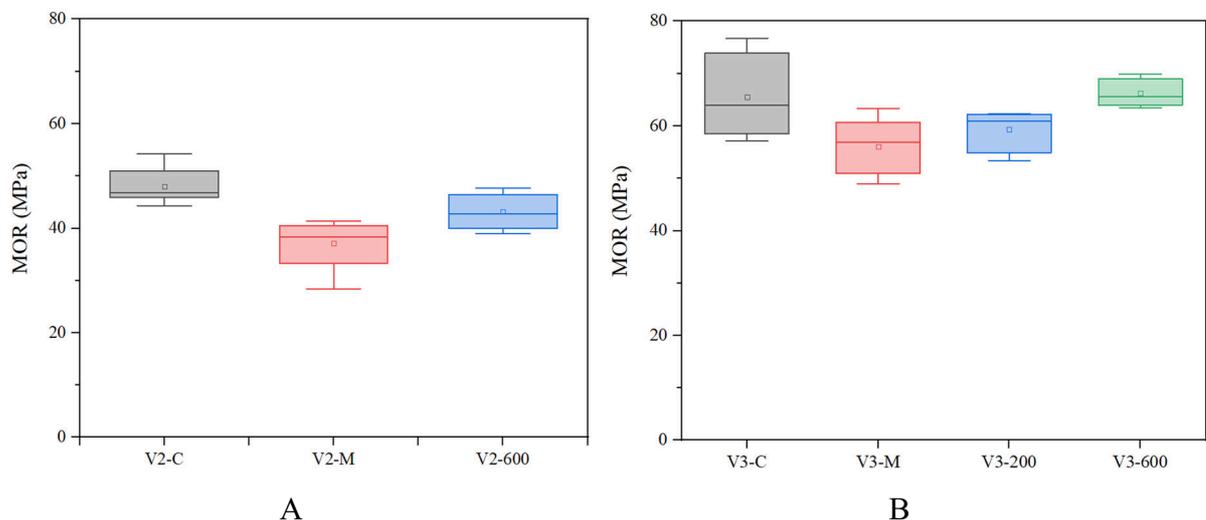
Com o teste de *post-hoc* de Games-Howell, realizado após a ANOVA de Welch (ANEXOS I e II), comprovou-se que esta diferença ocorreu entre todos os tratamentos avaliados do grupo V2. O tratamento V2-C obteve um melhor desempenho para o MOE, seguido dos tratamentos V2-600 e V2-M, respectivamente. Já para o grupo V3, o teste de Games-Howell não indicou diferença significativa estatisticamente, para significância de 10%, entre os tratamentos V3-C e V3-600, assim como para os tratamentos V3-200 e V3-M.

A homogeneidade das médias dos tratamentos V3-200 e V3-M indica que não há diferença significativa em uma emenda única ao centro da viga e transpassar 200 mm as emendas, sendo esta última a medida recomendada pela norma NBR 7190:2022 para o transpasse mínimo entre emendas dentadas em madeira lamelada colada (MLC). Em seus estudos, Isleyen & Peker (2020), ao estudar diferentes transpasses de emendas dentadas em vigas de MLC, apontaram o transpasse de 200 mm como menos eficiente em relação ao de 600 mm, o mesmo observado no presente estudo, porém para vigas em LVL. Devido ao número insuficiente de amostras para o tratamento V2-200, a relação de desempenho do transpasse de 200 mm para o grupo V2 não pode ser usada na comparação de médias. Sugere-se refazer este estudo com um número maior e adequado de amostras, a fim de se obter uma confiabilidade de 95%.

4.5. MÓDULO DE RUPTURA (MOR)

Com base nos resultados dos testes de Shapiro-Wilk (Anexos III e IV), pode-se concluir que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese de normalidade nos grupos V2 e V3, para um nível de significância de 10%. Isso sugere que os dados nesses grupos podem ser considerados aproximadamente normais, com exceção do tratamento V2-200, por não atingir o número mínimo de três amostras estipulado pelo teste. Os gráficos de caixa (Figura 24) para os tratamentos dos grupos V2 e V3, em relação ao MOR, não apresentou valores discrepantes (*outliers*) tanto nos limites inferiores quanto superiores em todos os tratamentos.

Figura 23 - Gráfico de caixa para o teste de Shapiro-Wilk do MOR.



Onde: A – Tratamentos do Grupos V2; B – Tratamentos do Grupos V3.

Fonte: autor (2023).

Foi realizada a análise de variância de Welch (WELCH, 1951) para comparar as médias dos tratamentos nos grupos V2 e V3, utilizando um nível de significância de 10%. Os resultados indicaram diferenças estatisticamente significativas nos grupos V2 (valor- $p = 0,0085$) e V3 (valor- $p = 0,031$) (ANEXO III e VI), o que leva a rejeitar a hipótese nula de igualdade das médias dos tratamentos.

Ao avaliar as diferenças estatísticas entre os tratamentos por meio do teste de comparação de múltiplas médias (GAMES; HOWELL, 1976), para significância de 10%, notou-se no grupo V2 que, para o MOR, não houve diferença estatisticamente significativa

entre os tratamentos V2-M e V2-600, ao contrário do encontrado para o grupo V3, a única comparação de múltiplas médias que apresentou diferença significativa foi V3-M e V3-600.

No grupo V2, a não diferença estatística entre os tratamentos V2-M e V2-600 indica que o aumento de 400 mm no transpasse das emendas dentadas não foi suficiente para surtir uma melhora significativa no módulo de ruptura, sendo estes tratamentos com MOR inferior ao controle (V2-C). De acordo com Isleyen & Peker (2020), quanto menor número de camadas (lamelas), para vigas de madeira lamelada colada, menor é a influência do espaçamento entre emendas dentadas de lamelas adjacentes no MOR.

Os tratamentos do grupo V3 (V3-C, V3-M, V3-200 e V3-600) apresentaram um aumento de 35%, 53%, 53% e 51% no MOR em relação aos do grupo V2, para os respectivos tratamentos (V2-C, V2-M, V2-200 e V2-600). O aumento pode ser atribuído ao maior número de chapas de LVL que compõem as vigas do grupo V3, contendo assim uma maior área para distribuição de tensões, sendo os valores do MOR deste grupo semelhante ao encontrado por He et al. (2020), ao ensaiar experimentalmente vigas de madeira de pinus com emenda dentadas.

Os valores médios de carga máxima e de módulo de ruptura para vigas de LVL dos grupos V2 e V3 são apresentados na Tabela 4. A determinação precisa do MOR em vigas de LVL é de extrema importância para a correta avaliação do desempenho estrutural desses elementos. Esse parâmetro influencia diretamente o dimensionamento e a resistência das estruturas de madeira, fornecendo informações cruciais para garantir a segurança e a durabilidade das construções.

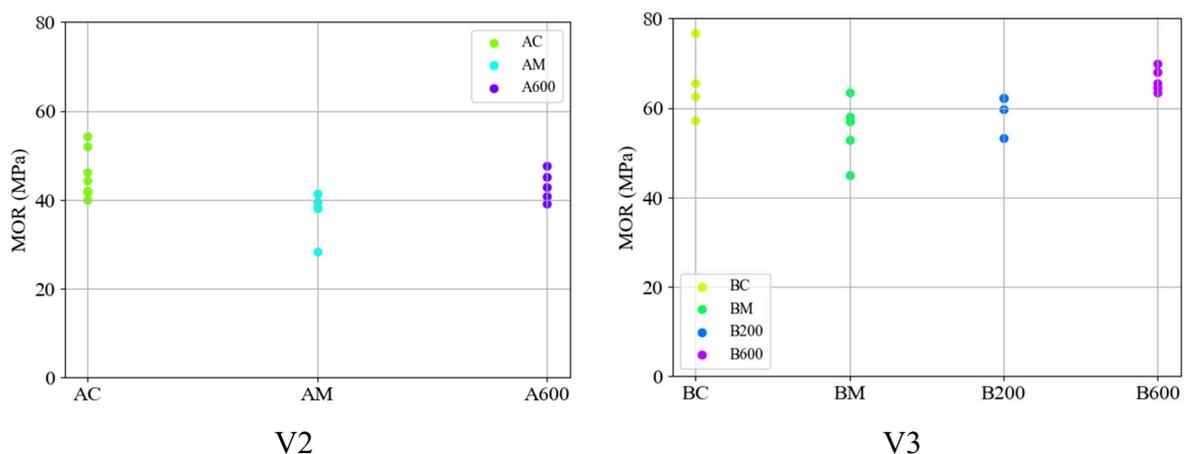
Tabela 4 - Valores do módulo de ruptura e da carga máxima obtidos para os grupos V2 e V3.

Grupo	Tratamento	Força máxima	Desvio padrão	Coefficiente variação	MOR Médio	Desvio padrão	Coefficiente variação
		<i>kN</i>	<i>kN</i>	%	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>	%
V2	V2-C	19,5	2,2	11,4	48	3,4	7,0
	V2-M	19,0	2,2	13,6	37	5,1	13,7
	V2-200	16,7	2,3	13,7	39	5,3	13,8
	V2-600	18,6	1,5	8,0	43	3,5	8,0
V3	V3-C	28,2	3,6	12,6	66	8,3	12,6
	V3-M	23,8	2,9	12,4	56	5,4	9,7
	V3-200	25,6	1,8	7,1	59	4,2	7,1
	V3-600	28,6	1,1	4,0	66	2,6	4,0

No grupo V2, os tratamentos propostos apresentaram diferentes valores médios de força máxima. O tratamento V2-C registrou a maior força máxima média de 19,5 kN, seguido pelo V2-600 com 18,6 kN, V2-200 com 16,7 kN e V2-M com 16,0 kN. A mesma tendência observada para o grupo V3, onde o tratamento V3-C registrou a maior força máxima média de 28,2 kN, seguido pelo V3-600 com 28,6 kN, V3-200 com 25,6 kN e V3-M com 23,8 kN. Essa variação nos valores médios indica um aumento da capacidade de carga nas vigas, à medida que o transpasse das emendas dentadas é aumentado, o que refletiu proporcionalmente no módulo de ruptura das vigas. Em ambos os grupos, V2 e V3, o tratamento com a emenda dentada única posicionada ao centro do vão, V2-M e V3-M, apresentou uma capacidade de carga 18,4% e 15,6% em relação aos tratamentos controles, V2-C e V3-C, respectivamente.

A tendência de redução de aproximadamente 20% na rigidez das vigas com emenda única ao centro se repetiu na determinação do módulo de ruptura, onde o tratamento V2-M e V3-M apresentaram uma redução de 23,1% e 14,4% em relação aos tratamentos controles V2-C e V3-C, respectivamente (Figura 23). A medida em que as emendas dentadas foram espaçadas nas vigas de LVL, a influência das emendas no módulo de ruptura apresentou uma redução significativa, sendo 19,8% e 9,4% nos tratamentos V2-200 e V3-200, em relação aos controles V2-C e V3-C, respectivamente. A diferença de 10,4% na redução entre os tratamentos V2-200 e V3-200, pode ser atribuída a uma melhor distribuição de tensões nas vigas V3-200, devido ao aumento de seção transversal.

Figura 24 - MOR dos tratamentos dos grupos V2 e V3.



Fonte: autor (2023).

Ao avaliar o transpasse de 600 mm entre emendas dentadas para os grupos V2 e V3, observou-se uma variação significativa nos resultados do módulo de ruptura (MOR). No tratamento V2-600, houve uma redução de 10,7% no MOR em relação ao tratamento controle V2-C, indicando uma diminuição na resistência da viga. Por outro lado, as vigas do tratamento V3-600 apresentaram um aumento de 1,3% no MOR em relação ao tratamento controle V3-C, sugerindo um possível reforço estrutural proporcionado pelas emendas dentadas nesse caso específico. Esses resultados destacam a influência do transpasse das emendas dentadas no desempenho mecânico das vigas de LVL e ressaltam a importância de uma cuidadosa seleção e configuração dessas emendas para garantir a integridade estrutural e a resistência adequada das vigas de madeira laminada colada.

De acordo com a NBR 7190 (2022), a redução da resistência de um elemento estrutural que contenha emendas dentadas não deverá exceder o limite de 20% em relação a um elemento estrutural isento de emendas, sendo o tratamento V2-M o único dos tratamentos ensaios a ultrapassar este limite. Isto sugere que, para vigas de LVL formadas por duas chapas madres, sejam considerados transpasses entre emendas dentadas superiores a 200 mm e novamente avaliar o desempenho a flexão a quatro pontos, com um conjunto amostral de maior abrangência.

5. CONCLUSÃO

No presente estudo, foram realizados ensaios experimentais de flexão estática a quatro pontos de vigas de LVL, avaliando a influência de emendas dentadas transpassadas nos módulos de elasticidade e de ruptura das vigas. Foram fabricadas vigas com duas (V2) e três (V3) segmentos de LVL na posição *flatwise*, com e sem emendas dentadas. As emendas das vigas estavam distanciadas em 200 mm e 600 mm, e também localizadas ao centro do vão. Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- os valores médios do MOE para vigas duplas (V2) e triplas (V3) de LVL sem emendas dentadas foram de 6760 MPa e 5960 MPa, respectivamente, enquanto os valores médios do MOR para os mesmos tratamentos foram de 48 MPa e 66 MPa, respectivamente;

- as reduções do MOE dos tratamentos V2-M, V2-200, V2-600, em relação ao tratamento controle V2-C foram de 26,85%, 19,62%, 7,91%, respectivamente, enquanto que para as vigas V3-M, V3-200 e V3-600, em relação ao tratamento V3-C, as reduções foram de 19,65%, 17,15%, 1,2%, respectivamente;

- as reduções do MOR dos tratamentos V2-M, V2-200, V2-600, V3-M e V3-200 em relação aos tratamentos controle V2-C e V3-C foram de 23,4%, 19,8%, 10,7%, 14,4%, 9,4%, respectivamente. Com exceção do tratamento V3-600, que apresentou um acréscimo no MOR de 1,3% em relação ao controle;

- a redução do MOR do tratamento V2-M foi superior à redução recomendada pela norma NBR 7190 (2022), não sendo recomendada esta configuração de união de chapas LVL para formação de vigas;

- as reduções de rigidez e de resistência ocorridas nos tratamentos V2-200 e V3-200 estão próximas a redução máxima de 20% indicada pela norma NBR 7190:2022, mostrando que o transpasse mínimo de 200 mm atende o exigido pela regulamentação técnica, porém o melhor desempenho mecânico ocorreu para o transpasse de 600 mm;

- os tratamentos V2-M e V3-M, nos quais as emendas dentadas eram posicionadas no centro do vão, exibiram predominantemente rupturas abruptas na emenda dentada, caracterizadas como Modo IV, não sendo recomendadas.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 7190-1, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento, 2022.
- AWALUDIN, Ali; IRAWATI, Inggar Septhia; SHULHAN, M. Afif. Two-dimensional finite element analysis of the flexural resistance of LVL Sengon non-prismatic beams. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 10, 2019.
- BAL, Bekir Cihad. Some physical and mechanical properties of reinforced laminated veneer lumber. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 68, p. 120–126, 2014.
- BODIG, Jozsef;; JAYNE, Manjamine A. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. [S. l.: s. n.], 1982.
- BUSTOS, Cecilia *et al.* Effects of curing time and end pressure on the tensile strength of finger-jointed black spruce lumber. **Forest Products Journal**, [s. l.], v. 53, n. 11–12, p. 85–89, 2003.
- CHEN, Zi xiang *et al.* Review on antibacterial biocomposites of structural laminated veneer lumber. **Saudi Journal of Biological Sciences**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. S142–S147, 2016.
- CWC, Canadian Wood Council. **Laminated Veneer Lumber (LVL)**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://cwc.ca/how-to-build-with-wood/wood-products/structural-composite/laminate-veneer-lumber/>.
- D. LAMB-SHINE; R.W. WANDS. **PRODUCTION, MARKETING AND USE OF FINGER-JOINTED SAWNWOOD: Structural finger-joints**. 1. ed. New York: M. Nijhoff / W. Junk Publishers, 1982.
- DE ARAUJO, Victor Almeida *et al.* Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [s. l.], v. 37, n. 90, p. 189, 2017.
- DE LÁRA SANTOS, Airton Mauro; DEL MENEZZI, Cláudio Henrique Soares; BORTOLETTO, Geraldo. Comportamento teórico e experimental de vigas de madeira em perfil I: Efeito do tipo de alma na resistência, rigidez e deslocamento vertical. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, [s. l.], n. 82, p. 131–141, 2009.
- DE MELO, Rafael Rodolfo; DEL MENEZZI, Cláudio Henrique Soares. Influence of veneer thickness on the properties of LVL from Paricá (*Schizolobium amazonicum*) plantation trees. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 72, n. 2, p. 191–198, 2014.
- DUTKO, P.; STELLER, S.; KOZELOUH, B. Research into and experience of the use of finger-joints in timber structures in Czechoslovakia. *Em*: PRODUCTION, MARKETING AND USE OF FINGER-JOINTED SAWNWOOD. Dordrecht: Springer, 1982. p. 35–47.
- EL HAOUZALI, Hafida *et al.* Mechanical properties of laminated veneer lumber produced from ten cultivars of poplar. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 78, n. 4, p. 715–722, 2020.

EN 408, EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties.** [S. l.: s. n.], 1995.

EN 14374, EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Timber structures - structural laminated veneer lumber - requirements.** [S. l.]: German Institute for Standardisation, 2005.

FOLLRICH, Jürgen *et al.* Tensile strength of softwood butt end joints. Part 1: Effect of grain angle on adhesive bond strength. **Wood Material Science and Engineering**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 83–89, 2014.

FOREST PRODUCTS LABORATORY (US), FOREST PRODUCTS LABORATORY (US). **Wood handbook: Wood as an engineering material.** [S. l.: s. n.], 1987.

GAMES, Paul A.; HOWELL, John F. Pairwise Multiple Comparison Procedures with Unequal N's and/or Variances: A Monte Carlo Study. **Journal of Educational Statistics**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 113–125, 1976.

H'NG, P.S.; PARIDAH, M.T.; CHIN, K.L. Bending Properties of Laminated Veneer Lumber Produced from Keruing (*Dipterocarpus* sp.) Reinforced with Low Density Wood Species. **Asian Journal of Scientific Research**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 118–125, 2010.

HABIPI, Besnik; AJDINAJ, Dritan. Wood Finger-Joint Strength as Function of Finger Length and Slope Positioning of Tips. **International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)**, [s. l.], v. 2, n. 12, p. 128–132, 2015.

HAKKARAINEN, Jouni *et al.* LVL Handbook Europe. [s. l.], p. 228, 2019.

HE, Sheng *et al.* Application of Finite Element Analysis in Properties Test of Finger -jointed Lumber. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, [s. l.], p. 0–10, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.04.006>.

HIZIROGLU, Salim. Laminated Veneer Lumber (LVL) as a Construction Material. **Division of Agricultural Sciences and Natural Resources**, [s. l.], v. 100, n. 3, p. 1–4, 2009.

IŞLEYEN, U.K.; PEKER, I. Effects of layer number and finger direction on bending behavior of glulam beams. **BioResources**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 4217–4233, 2020.

ISO 13910. INTERNATIONAL STANDARD Timber structures — Strength graded timber — Test methods for structural properties. [s. l.], v. 2014, 2014.

ISSA, Camille A.; KMEID, Ziad. Advanced wood engineering: Glulam beams. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 99–106, 2005.

IWAKIRI, Setsuo *et al.* Produção de LVL com lâminas de *Schizolobium amazonicum*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*. **Cerne**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 557–563, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cerne/v16n4/a15v16n4.pdf>.

JOKERST, RONALD W. Finger-Jointed Wood Products. **Forest Products Laboratory**, [s. l.], n. April, 1981.

KESKIN, Hakan. Impact of impregnation chemical on the bending strength of solid and laminated wood materials. **Materials and Design**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 796–803, 2009.

KHELIFA, M. *et al.* Experimental and numerical analysis of CFRP-strengthened finger-jointed timber beams. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, [s. l.], v. 68, p. 283–297, 2016.

LI, Wanzhao *et al.* The effect of structural changes on the compressive strength of LVL. **Wood Science and Technology**, [s. l.], v. 54, n. 5, p. 1253–1267, 2020.

LIMA, Nerci Nina *et al.* Influência da gramatura na resistência da linha de cola aos esforços de cisalhamento em painéis compensados de *Copaifera duckei* Dawyer e *Eperua oleifera* Ducke. **Acta Amazonica**, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 83–90, 2011.

LOKAJ, Antonin; VAVRUSOVA, Kristyna; MIKOLASEK, David. Analysis of Behavior and Carrying Capacity of Glued Timber-Timber Joints Loaded with Bending Moment. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 190, p. 263–270, 2017.

MACEDO, Alcebiádes Negrão. **Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): Avaliação de método de ensaio**. 1996. 115 f. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 1996.

MOLINA, Julio Cesar *et al.* Avaliação do comportamento de vigas retangulares (LVL) com laminação horizontal e vertical Evaluation of the behavior of rectangular beams (LVL) with horizontal and vertical lamination. [s. l.], 2013.

MUSSELMAN, Eric S. *et al.* The effect of holes on the creep behavior and flexural capacity of laminated veneer lumber (LVL) beams. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 180, p. 167–176, 2018.

NBR

NOGUEIRA, RODRIGO DE SOUZA. Proposta de um método de ensaio para controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e de LVL. **Escola de Engenharia de São Carlos**, [s. l.], 2017.

ÖZÇİFÇİ, Ayhan; OKÇU, Oktay. Impacts of some chemicals on combustion properties of impregnated laminated veneer lumber (LVL). **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 199, n. 1, p. 1–9, 2008.

ÖZÇİFÇİ, Ayhan; YAPICI, Fatih. Structural performance of the finger-jointed strength of some wood species with different joint configurations. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 22, n. 7, p. 1543–1550, 2008.

- OZKAYA, Kadir *et al.* Utilization of extract of fresh tree leaves as extender in synthetic adhesives for laminated veneer lumber (LVL). **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 44, p. 67–70, 2013.
- PALMA, Hernando Alfonso Lara; BALLARIN, Adriano Wagner. Propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL de eucalyptus grandis. **Ciencia Florestal**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 557–564, 2011.
- PALMA, Pedro; STEIGER, René. Structural health monitoring of timber structures – Review of available methods and case studies. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 248, p. 118528, 2020.
- PELLERIN, R. Testing reliability of finger joints used in laminated beams. **Forest Products Research Society**, [s. l.], 1970.
- PEREIRA, Marcos Cesar de Moraes *et al.* Evaluation of tensile strength of a eucalyptus grandis and eucalyptus urophylla hybrid in wood beams bonded together by means of finger joints and polyurethane-based glue. **Materials Research**, [s. l.], v. 19, n. 6, p. 1270–1275, 2016.
- PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Wood Adhesives**. [S. l.]: Elsevier Science B.V., 2011-. ISSN 1042-6914.
- POT, Guillaume; DENAUD, Louis Etienne; COLLET, Robert. Numerical study of the influence of veneer lathe checks on the elastic mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) made of beech. **Holzforschung**, [s. l.], v. 69, n. 3, p. 337–345, 2015.
- PURBA, Citra Yanto Ciki *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**, [s. l.], v. 0, n. 0, p. 0, 2019.
- QIN, Renyuan *et al.* Structural performance and charring of loaded wood under fire. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 228, n. November 2020, p. 111491, 2021.
- ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. [S. l.]: Cell wall chemistry, 2005.
- SELBO, M. L. Effect of joint geometry on tensile strength of finger joints. **Forest Prod**, [s. l.], p. 390–400, 1963.
- SERRANO, Erik; GUSTAFSSON, Per Johan. Influence of bondline brittleness and defects on the strength of timber finger-joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 9–17, 1999.
- SHAPIRO, S S; WILK, ; M B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, [s. l.], v. 52, p. 591–611, 1965. Disponível em: Acesso em: 19 maio 2023.

SHIELDS, J. Adhesive materials and properties. **Adhesives Handbook**, [s. l.], p. 30–86, 1984.

SHUKLA, S. R.; RAO, R. V.; SHARMA, S. N. Evaluation of strength properties of parallel splint lumber (PSL) and its comparison with laminated veneer lumber (LVL), rubber wood and teak. **Holz als Roh - und Werkstoff**, [s. l.], v. 57, n. 4, p. 267–270, 1999.

STEICO. **Laminated veneer lumber construction panel LVL**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.archiexpo.com/prod/steico/product-59793-2164939.html>. .

TRAN, Van Dang; OUDJENE, Marc; MÉAUSOONE, Pierre Jean. FE analysis and geometrical optimization of timber beech finger-joint under bending test. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, [s. l.], v. 52, p. 40–47, 2014.

TUKEY, John. Comparing Individual Means in the Analysis of Variance. **Biometrics**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 99–114, 1949. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/3001913?origin=JSTOR-pdf>. Acesso em: 19 maio 2023.

WELCH, B L. **ON THE COMPARISON OF SEVERAL MEAN VALUES: AN ALTERNATIVE APPROACH**. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <http://biomet.oxfordjournals.org/>.

WHITE, Halbert. A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity. **Econometrica**, [s. l.], v. 48, n. 4, p. 817–838, 1980. Disponível em: Acesso em: 19 maio 2023.

ANEXO I – NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK E ANOVA DE WELCH PARA O MOE (V2)

Normality Test

Notes

Input Data

Descriptive Statistics

		N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
B	AC	8	0	6754,99381	429,1252	151,71867
	AM	5	0	4940,5468	230,50029	103,08287
	A200	2	0	5429,8259	309,46656	218,8259
	A600	5	0	6198,62335	109,29289	48,87727

NormalityTest

Shapiro-Wilk

		DF	Statistic	p-value	Decision at level(10%)
B	AC	8	0,94971	0,70829	Can't reject normality
	AM	5	0,84031	0,16578	Can't reject normality
	A200	--	--	--	a*
	A600	5	0,93985	0,66489	Can't reject normality

B(AC): At the 0.1 level, the data was significantly drawn from a normally distributed population.
 B(AM): At the 0.1 level, the data was significantly drawn from a normally distributed population.
 a*: Too few data points, data points number should not less than 3 for Shapiro-Wilk.

Welch ANOVA

Notes

Input Data

Welch's Test

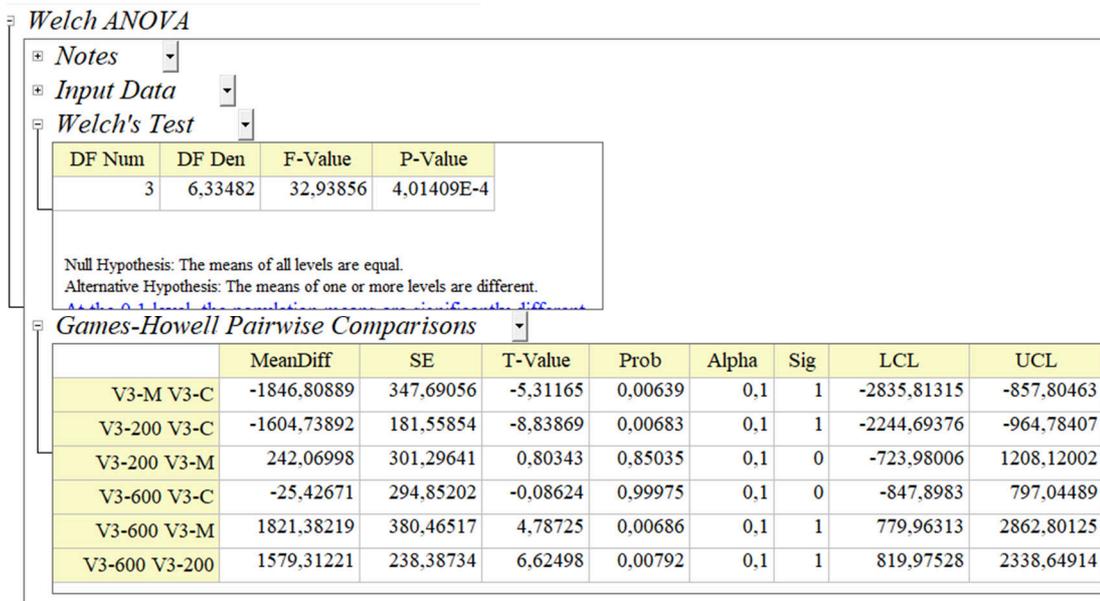
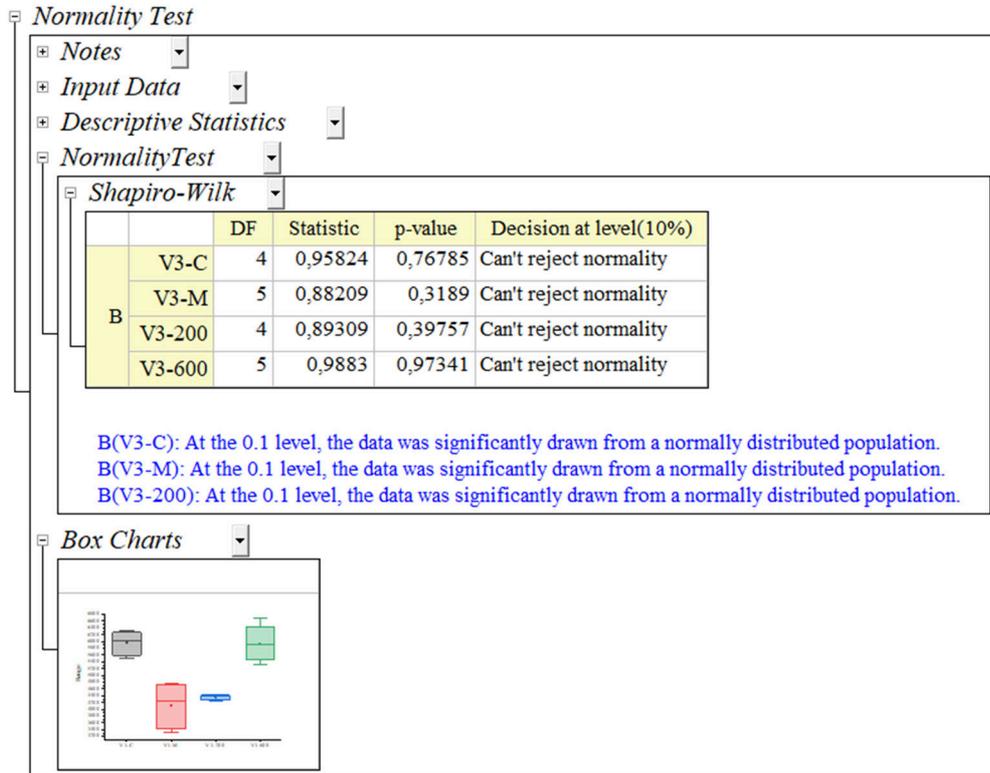
DF Num	DF Den	F-Value	P-Value
2	8,62291	67,9625	3,70635E-6

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.1 level, the null hypothesis is rejected.

Games-Howell Pairwise Comparisons

	MeanDiff	SE	T-Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
V2-M V2-C	-1814,44701	183,42473	-9,89205	2,37875E-6	0,1	1	-2234,34278	-1394,55125
V2-600 V2-C	-556,37046	159,39743	-3,49046	0,01873	0,1	1	-934,01808	-178,72284
V2-600 V2-M	1258,07655	114,08358	11,02767	1,11933E-4	0,1	1	967,87617	1548,27693

ANEXO II – NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK E ANOVA DE WELCH PARA O MOE (V3)



ANEXO III – NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK E ANOVA DE WELCH PARA O MOR (V2)

Normality Test

Notes
 Input Data
 Descriptive Statistics
 NormalityTest

Shapiro-Wilk

		DF	Statistic	p-value	Decision at level(10%)
C	V2-C	8	0,87104	0,15431	Can't reject normality
	V2-M	5	0,78541	0,0613	Reject normality
	V2-600	5	0,98011	0,93522	Can't reject normality

C(V2-C): At the 0.1 level, the data was significantly drawn from a normally distributed population.
 C(V2-M): At the 0.1 level, the data was not significantly drawn from a normally distributed population.

Welch ANOVA

Notes
 Input Data
 Welch's Test

DF Num	DF Den	F-Value	P-Value
2	8,1081	9,15715	0,00854

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

Games-Howell Pairwise Comparisons

	MeanDiff	SE	T-Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
V2-M V2-C	-10,87404	2,56502	-4,23937	0,01189	0,1	1	-17,27539	-4,47269
V2-600 V2-C	-4,89048	1,9502	-2,50769	0,08071	0,1	1	-9,5026	-0,27837
V2-600 V2-M	5,98356	2,746	2,17901	0,14272	0,1	0	-0,7098	12,67691

ANEXO IV – NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK E ANOVA DE WELCH PARA O MOR (V3)

Normality Test

- Notes
- Input Data
- Descriptive Statistics
- NormalityTest
 - Shapiro-Wilk

		DF	Statistic	p-value	Decision at level(10%)
C	V3-C	4	0,94986	0,71527	Can't reject normality
	V3-M	5	0,98835	0,9736	Can't reject normality
	V3-200	4	0,81825	0,13919	Can't reject normality
	V3-600	5	0,9461	0,70933	Can't reject normality

C(V3-C): At the 0.1 level, the data was significantly drawn from a normally distributed population.
 C(V3-M): At the 0.1 level, the data was significantly drawn from a normally distributed population.
 C(V3-200): At the 0.1 level, the data was significantly drawn from a normally distributed population.

Welch ANOVA

- Notes
- Input Data
- Welch's Test

DF Num	DF Den	F-Value	P-Value
3	6,77012	5,38923	0,03086

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.1 level, the population means are significantly different.
- Games-Howell Pairwise Comparisons

	MeanDiff	SE	T-Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
V3-M V3-C	-9,42501	4,79966	-1,96368	0,31274	0,1	0	-23,91351	5,06349
V3-200 V3-C	-6,12641	4,63894	-1,32065	0,59399	0,1	0	-20,63341	8,38059
V3-200 V3-M	3,2986	3,20618	1,02882	0,73923	0,1	0	-5,61324	12,21044
V3-600 V3-C	0,85479	4,30385	0,19861	0,99672	0,1	0	-13,8877	15,59729
V3-600 V3-M	10,2798	2,6987	3,80916	0,0357	0,1	1	2,45224	18,10737
V3-600 V3-200	6,9812	2,40125	2,90732	0,11541	0,1	0	-0,33037	14,29278