

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

RODRIGO DE SOUZA NOGUEIRA

**Proposta de um método de ensaio para controle de qualidade na produção de elementos
estruturais de MLC e de LVL**

São Carlos

2017

RODRIGO DE SOUZA NOGUEIRA

Proposta de um método de ensaio para controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e de LVL

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências (Engenharia de Estruturas).

Orientador: Prof. Titular Carlito Calil Junior

São Carlos

2017

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

N778
p Nogueira, Rodrigo de Souza
Proposta de um método de ensaio para controle de
qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e
LVL / Rodrigo de Souza Nogueira; orientador Carlito
Calil Junior . São Carlos, 2017.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de
Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. Estrutura de madeira. 2. Madeira laminada
colada. 3. Laminated veneer lumber. 4. Adesivos
estruturais. 5. Normalização. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RODRIGO DE SOUZA NOGUEIRA.**

Título da dissertação: "Proposta de um método de ensaio para o controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e de LVL".

Data da defesa: 11/04/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Carlito Calil Junior (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Julio Cesar Molina**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Itapeva)

APROVADO

Prof. Dr. **Adriano Wagner Ballarin**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Botucatu)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas):
Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

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

Aos meus pais, Antônio Nogueira da Costa e
Joanaci Noemi de Souza Nogueira, por
mostrarem que o maior tesouro de uma pessoa
é o conhecimento.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por iluminar meu caminho durante toda essa trajetória.

Aos meus pais, Antônio Nogueira da Costa e Joanaci Noemi de Souza Nogueira, pelo grande apoio e incentivo dado durante todo esse caminho até aqui. Agradeço pelos ensinamentos e conselhos fundamentais que foram alicerce para minha formação como pessoa.

A minha irmã, Bruna de Souza Nogueira, pelo grande apoio e compreensão e a minha namorada, Priscila Lais Blanck, pelo grande incentivo dado durante toda essa fase e compreensão, pela ajuda nos momentos mais complicados, pelo os momentos alegres proporcionados e o grande companheirismo. Esses fatos contribuíram muito para alcançar esse objetivo.

Ao prof. Tit. Carlito Calil Junior pelo o conhecimento e os ensinamentos transmitidos durante toda essa pesquisa, além do grande incentivo e apoio para realização deste trabalho. Ainda, obrigado por proporcionar essa grande oportunidade e pela ótima orientação, confiança depositada, paciência e amizade construída.

Ao prof. Dr. Antonio Alves Dias e ao prof. Tit. Francisco Antonio Rocco Lahr pelo o ensinamento acadêmico sobre estruturas de madeira.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Estruturas, que contribuíram para minha formação acadêmica.

Aos funcionários do LaMEM, Bragatto, Roberto e Cido, e, principalmente, Samuel, Silvo, Jaime, Arnaldo, que auxiliariam na realização dos ensaios desse trabalho. Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas.

Aos amigos do LaMEM, Felipe, Tiago, Lorenzo, Caio, Amós, Raquel e Bia, e aos companheiros do Departamento de Engenharia de Estruturas, Heider, Leonardo Marcolin, Leonardo Borges, Tulio, Arthur, Matheus, Pablo e Geovanne.

Aos professores da Universidade Estadual de Maringá, que foram responsáveis por minha formação acadêmica e, principalmente, a prof^a. Dr^a. Nara Villanova Menon pelo conhecimento transmitido durante a iniciação científica e incentivo para realização do mestrado e pela amizade construída.

A Universidade de São Paulo pela a grande oportunidade proporcionada e devido as excelentes instalações para o desenvolvimento pleno deste trabalho.

A Capes pela a bolsa concedida.

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”. (Antoine Laurent de Lavoisier)

RESUMO

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

Atualmente, as indústrias brasileiras recorrem a normas de outros países para o controle de qualidade para a caracterização de elementos estruturais feitos de Madeira Laminada Colada (MLC) e de LVL (*Laminated Veneer Lumber*) devido à ausência de especificações nacionais. Este trabalho teve como finalidade a verificação da adequação de alguns métodos de ensaios propostos nos projetos de norma ABNT NBR PN 02:126.10-001-3 e ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 para determinar as propriedades dos elementos estruturais de madeira colada para o controle de qualidade da indústria produtora. Para tanto, foram obtidos das indústrias vários grupos de vigas de MLC e grupos de emendas dentadas produzidos com diversas combinações de madeiras e adesivos. Também, foram obtidos grupos de vigas de LVL na posição horizontal e grupos de vigas de LVL na posição de vertical. Foram realizados testes de flexão estática para determinação do módulo de ruptura e de elasticidade de todas as vigas. Além disso, das vigas foram retirados corpos de prova para realização dos ensaios de cisalhamento na linha de cola, delaminação e compressão paralela às fibras, enquanto as emendas dentadas foram analisadas pelo ensaio de tração paralela às fibras. Os procedimentos empregados podem ser considerados adequados para aplicação pelas indústrias no controle de qualidade da produção de elementos estruturais de MLC e de LVL. O ensaio de delaminação para adesivos expostos a ambientes externos, proposto no projeto de norma, pode ser analisado como prático e eficaz. Em relação aos testes de cisalhamento, o número de análises por amostra pode ser reduzido, desde que, priorize o ensaio na região central da seção transversal devido à maior concentração de tensões de cisalhamento. Como era esperado, as emendas dentadas formaram pontos de fragilidade, reduzindo a resistência de algumas vigas e tendo sua ruptura evidenciada por esforço de tração. No LVL, a posição vertical apresentou melhor resistência à flexão e ao cisalhamento do que a horizontal. O projeto de norma é apresentado em anexo nesse trabalho.

Palavras chaves: Estrutura de madeira. Madeira laminada colada. *Laminated veneer lumber*. Adesivos estruturais. Normalização.

ABSTRACT

NOGUEIRA, R. S. **Proposal of a test method for quality control in the MLC and LVL structural elements production.** 2017. 150 p. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structures)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2017.

Nowadays, the Brazilian industries follow the foreign countries standard regulation to the quality control of characterization of structural elements produced from Glued Laminated Timber (glulam) and Laminated Veneer Lumber (LVL) due to the absence of national specifications. This work has the purpose of verifying the suggested methods of regulation projects, such as ABNT NBR PN 02:126.10-001-3 and ABNT NBR PN 02:126.10-001-5, to determine the properties of glued timber structural elements to quality control of producer industry. Therefore, glulam beams and fingerjoints groups, produced from several combinations of woods and adhesives, were obtained from industries. In addition, it was used flatwise LVL beams groups and edgewise LVL beams groups. It was made the static bending tests to determine strength and stiffness for each beam. Furthermore, from the beams it was extracted samples in order to test shear in the glue line, delamination and parallel grain compression whereas the fingerjoints were analysed by the parallel grain tensile test. The procedures taken on the experimental program can be considered suitable for industrial usage at quality control of production of structural elements from glulam and LVL. The delamination test for adhesive exposed to external environment, proposal in the new standard, can be analysed as practical and effective. In relation to the shear test, the number of analysis by sample can be reduced, whether prioritized the test in the central region of transversal section due to higher shear stress concentration. As expected, the fingerjoints formed fragile points, reducing strength for some beams and by presenting rupture when tensile stressed. In the LVL, the edgewise groups presented better bending and shear resistance than flatwise groups. The new test method is presented in annex in this dissertation.

Keywords: Timber structure. Glued laminated timber. Laminated veneer lumber. Structural adhesives. Standardization.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	Considerações iniciais.....	19
1.2	Justificativa	21
1.3	Objetivos	21
1.3.1	Objetivo geral	21
1.3.2	Objetivos específicos	21
2	ADESIVOS ESTRUTURAIS.....	23
2.1	Características da madeira ligadas à colagem	25
2.1.1	Densidade	25
2.1.2	Extrativos.....	25
2.1.3	Permeabilidade	26
2.1.4	Molhabilidade.....	27
2.2	Tipos de adesivos.....	28
2.2.1	Melamina-uréia-formaldeído (MUF)	29
2.2.2	Poliuretano.....	30
2.2.3	Adesivos fenólicos.....	30
3	MADEIRA LAMINADA COLADA	31
3.1	Características das lamelas para a produção do MLC	32
3.2	Classificação e distribuição das lamelas	34
3.3	Emendas dentadas	34
3.4	Cura do adesivo.....	36
3.5	Estudos desenvolvidos sobre MLC.....	37
4	LAMINATED VENEER LUMBER.....	42
4.1	Processo de produção de painéis <i>Laminated Veneer Lumber</i>	43
4.2	Aquecimento dos troncos de madeira	44
4.3	Posicionamento das lâminas	45
4.4	Classificação das lâminas	46
4.5	Distribuição das lâminas	47
4.6	Ligações das lâminas e dos painéis.....	48
5	NORMAS DE MÉTODOS DE ENSAIOS.....	50
5.1	Normas canadenses.....	50
5.2	Normas americanas	52
5.3	Normas europeias	53
5.4	Norma brasileira sobre madeira laminada colada	55
5.5	Comparação entre os procedimentos de delaminação	56
5.6	Conclusões sobre a revisão bibliográfica.....	58

6	MATERIAIS E MÉTODOS	59
6.1	Materiais	59
6.2	Adesivos estruturais	63
6.3	Métodos	64
6.3.1	Ensaio de flexão estática a quatro pontos	64
6.3.2	Ensaio de cisalhamento	66
6.3.3	Ensaio de delaminação	69
6.3.3.1	<i>Procedimento descrito na CSA 112.9:2004</i>	70
6.3.3.2	<i>Procedimento descrito na ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5 baseado na EN 14080:2013</i>	70
6.3.4	Ensaio de tração nas emendas dentadas	71
6.3.5	Ensaio de compressão paralela às fibras	74
6.3.6	Resistência característica das propriedades mecânicas	75
6.3.7	Análise estatística dos resultados	75
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
7.1	Ensaio de flexão estática a quatro pontos para as vigas de MLC	77
7.2	Ensaio de flexão estática a quatro pontos para as vigas de LVL na posição horizontal	84
7.3	Ensaio de flexão estática a quatro pontos para as vigas de LVL na posição vertical	86
7.4	Comparação das propriedades mecânicas das vigas de LVL	87
7.5	Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras na linha de cola da MLC	89
7.6	Análise das linhas de colas ao cisalhamento devido sua posição nas amostras	93
7.7	Ensaio de cisalhamento na linha de cola do LVL na posição horizontal	100
7.8	Ensaio de cisalhamento do LVL na posição vertical	102
7.9	Comparação entre o cisalhamento nas duas direções do LVL	103
7.10	Ensaio de delaminação da MLC para uso em ambientes externos	104
7.10.1	Procedimento da norma canadense CSA 112.9:2004	104
7.10.2	Procedimento do projeto de norma brasileiro ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5	106
7.11	Ensaio de delaminação do LVL, na posição horizontal, para uso em ambientes externos	108
7.12	Ensaio de delaminação do LVL, na posição vertical, para uso em ambientes externos	109
7.13	Ensaio de tração paralela às fibras nas emendas dentadas de peças estruturais	109
7.14	Ensaio de compressão paralela às fibras para as vigas de MLC	112
7.15	Ensaio de compressão paralela às fibras para as vigas de LVL	114
8	CONCLUSÕES	116
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O consumo desenfreado e a ganância das grandes corporações têm levado à escassez dos recursos naturais da Terra. Nos últimos anos, a busca pelo desenvolvimento sustentável tornou-se assunto de extrema importância ao redor do mundo. Desta forma, aumentou-se o interesse no uso de energia e matéria-prima renováveis para aliviar o impacto causado pela humanidade, principalmente, a partir da Revolução Industrial.

As florestas plantadas possuem um papel importante nessa questão, pois fornecem material renovável para o mercado e, também, ajudam a combater o desmatamento ilegal das florestas nativas. De acordo com Calil Junior e Dias (1997), a madeira sendo extraída conscientemente torna-se uma mercadoria ilimitada.

Conforme a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (2006, 2013), só entre os anos de 2005 e 2012, as florestas de eucaliptos e pinus cresceram cerca de 27,15% em todo o país, sendo que a maior concentração de florestas do tipo pinus está localizada na região sul com uma área total de 1.562.782 ha e a do tipo eucalipto na região sudeste com uma área equivalente a 5.102.030 ha. Essa matéria-prima tem como principal finalidade a produção de celulose para o abastecimento do mercado nacional e também de uma parte do mercado internacional.

A construção civil é uma das atividades econômicas que consome muitos recursos naturais. Dentre os principais materiais empregados nessa indústria têm-se o aço, a madeira e o concreto armado. No que se refere à madeira, nos países desenvolvidos, ela ganhou mais espaço nas edificações devido à aplicação de novas tecnologias como: *wood frame*, *cross laminated timber* (CLT), madeira laminada colada (MLC), *laminated veneer lumber* (LVL), *gridshell*, entre outros. No Brasil, algumas dessas novas técnicas estão começando a aparecer em pequenas proporções nas construções. Até então o baixo consumo desses produtos está ligado, principalmente, a questões culturais. Desta maneira, no país, a madeira é popularmente usada como: estruturas provisórias e definitivas.

Os materiais estruturais mais usuais nas edificações são a madeira, o aço e o concreto. A madeira possui alguns benefícios perante os outros materiais, principalmente, por sua fonte de energia de produção ser proveniente do sol, enquanto o aço e o concreto precisam, respectivamente, do carvão e do óleo para sua fabricação. Ademais, a relação entre a energia

para produção e a sua resistência é a menor entre os materiais, assim como possui uma relação mais favorável entre a sua resistência e a sua densidade. Em vista disso, sua aplicação deve ser estimulada por ser um material ecologicamente correto (CALIL JUNIOR; DIAS, 1997).

Um dos produtos engenheirados de madeira que tem sua qualidade final condicionada em grande parte pelo processo de produção é a MLC. Para se obter um material que atenda as normas vigentes, as indústrias necessitam ter uma excelente precisão nas etapas de sua montagem. Além disso, os fabricantes podem verificar as características de seu produto, preferencialmente, em condições de laboratório (CALIL NETO et al., 2014). Isso também pode ser estendido para a produção de elementos estruturais feitos de LVL.

Atualmente, o controle de qualidade desses elementos estruturais pelas para as empresas brasileiras só pode ser realizado por meio de normas de outros países como, por exemplo, a norma canadense, a americana e a europeia. Dentre os principais ensaios para caracterização da MLC e dos adesivos estruturais são especificados os de flexão estática em quatro pontos, cisalhamento na linha de cola, tração paralela às fibras das emendas dentadas, fluência e delaminação. Todavia, cada norma possui procedimentos distintos para cada teste.

No Brasil, a ABNT NBR 7190:1997 apresenta alguns procedimentos de ensaios para corpos de prova isentos de defeitos para determinar a qualidade da colagem. Todavia os procedimentos não são realizados em elementos estruturais. No entanto, os projetos de norma ABNT NBR ISO PN 02:126.10-001-3 e ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 estão em fase final de redação para consulta nacional e poderão ser usados para a verificação das propriedades mecânicas dos elementos estruturais de madeira laminada colada e dos adesivos estruturais.

Os métodos de ensaios descritos na ABNT NBR 7190:1997 foram usados nos trabalhos de Macêdo (1996), Jesus (2000), Macêdo et al. (2000), Azambuja (2002), Zangiácomo (2003), Macêdo et al. (2008) e Reis e Jesus (2008). Por outro lado, Calil Neto (2011) analisou o desempenho da combinação de adesivo, madeira e tratamento por meio dos métodos de ensaio da norma canadense. Cavalheiro (2014) usou os mesmos métodos da norma canadense para avaliar a viabilidade de produção de elementos estruturais de MLC com a madeira de paricá.

No LVL, os estudos de Menezzi et al. (2013) e Müller et al. (2015) foram realizados com amostras não estruturais para determinar a propriedade mecânica do produto estudado. Por outro lado, elementos com dimensões estruturais foram estudados por Palma e Ballarin (2011) e Molina et al. (2013), sendo que os ensaios realizados seguindo as prescrições da norma americana e da norma brasileira, respectivamente.

1.2 Justificativa

As empresas produtoras de MLC e de LVL buscam novas alternativas de adesivos e de espécies de madeira para produzir o elemento estrutural com a finalidade de melhorar a qualidade do produto e, também, promover maior durabilidade a estrutura, bem como reduzir os custos de produção. Para viabilizar a utilização com segurança dessas peças na construção civil é necessário conhecer suas características físicas e mecânicas, principalmente, nas regiões de adesão entre os materiais.

Atualmente a verificação das propriedades dos elementos estruturais de MLC é feita através de normas estrangeiras, uma vez que, a norma brasileira em vigor, ABNT NBR 7190:1997, não apresenta nenhum conteúdo sobre os ensaios que determinam a qualidade dos adesivos estruturais e das peças estruturais. Neste contexto, surge a necessidade de uma proposta de método de ensaio para fornecer as diretrizes para caracterização dos elementos estruturais produzidos em MLC e também em LVL. Dessa forma, o intuito dessa pesquisa foi a aplicação do método de ensaio em elementos estruturais de MLC e de LVL para contribuir com o controle de qualidade das empresas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo verificar a adequação dos textos normativos ABNT NBR ISO PN 02:126.10-001-3 e ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5 propostos para o controle de qualidade de elementos estruturais de MLC e de LVL produzidas no mercado nacional. Para isso, foram realizados vários ensaios para a determinação das propriedades mecânicas de uma série de vigas de MLC e de LVL, com diferentes tipos de cola e espécies de madeira, sendo, neste caso, analisado o desempenho dos adesivos estruturais usados na colagem.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Determinar o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) das vigas conforme o projeto de norma ABNT NBR ISO PN 02:126.10-001-3;
- b) Determinar a resistência mecânica das emendas por união dentadas conforme o projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5;

- c) Determinar a resistência mecânica dos adesivos por meio do ensaio de cisalhamento na linha de cola descrito no projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5;
- d) Analisar a eficiência dos adesivos por meio do ensaio de ciclo de delaminação conforme o projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5;
- e) Determinar a resistência à compressão conforme a norma ABNT NBR 7190:1997, adaptado para a verificação da classe de resistência das vigas.

2 ADESIVOS ESTRUTURAIS

Nos dias atuais, o uso dos adesivos abrange aplicações em setores mais variados da indústria. Na indústria madeireira, seu emprego tem grande importância na produção de alguns produtos engenheirados de madeira como: MLC, LVL, CLT, OSB (*oriented strand board*) e entre outros.

Nas empresas de elementos estruturais de madeira colada, antes da Segunda Guerra Mundial, somente eram usados adesivos de caseínas em sua linha de produção. Dessa maneira, os elementos estruturais não poderiam ficar em contato direto com água restringindo assim sua aplicação a ambientes internos. Com o surgimento dos adesivos sintéticos, desenvolvidos no período da guerra, ampliou-se a capacidade de utilização desses produtos devido ao bom desempenho dessas colas em condições adversas de umidade e temperatura (FREAS, 1949). Nessas fábricas, as coníferas têm sido usadas como fonte de matéria-prima, desde o início do século passado, para a produção de elementos estruturais de madeira colada. Em vista disso, a maioria dos adesivos estruturais disponíveis no mercado foram pensados e desenvolvidos especialmente para esse tipo de substrato (LEHMANN et al., 2016). Assim, na fabricação das peças estruturais de madeira colada, um componente fundamental é o tipo de adesivo que será aplicado.

No processo da adesão do adesivo com essa matéria-prima existem três principais fases para uma boa ligação. O primeiro passo está ligado à preparação adequada da superfície do aderente que receberá o material com a finalidade de proporcionar uma excelente união entre os dois componentes. Em seguida, a cola necessita interagir com a face da madeira para construir um contato de nível molecular. Por último, a fase de endurecimento do adesivo: nessa etapa a cura e a solidificação são primordiais para obter-se uma colagem satisfatória (FRIHART, 2005).

A madeira, como aderente, oferece uma adequada interação com o adesivo quando são tomadas as devidas precauções, uma vez que, um dos aspectos que impacta o desempenho de sua colagem está relacionado com o estado de sua superfície. Uma propriedade física da madeira responsável por melhorar sua capacidade aderente é a sua porosidade (DAVIS, 1997).

Segundo Knorz et al. (2014), as características de adesão das superfícies das lamelas de *Fraxinus excelsior* L. dependem do equipamento utilizado em sua preparação. Cada máquina produz um tipo diferente de textura nessa madeira devido aos danos causados nas

células das faces e, também, pela quantidade de fibrilação nessa região. O aplainamento das superfícies, método mais usual nas indústrias, acarreta uma diminuição nas propriedades de cisalhamento e delaminação das linhas de cola, em comparação com as lixadas e a *face-milled*, nos elementos estruturais destinados a ambientes úmidos.

Nesse contexto, outros aspectos da produção afetam o desempenho da colagem nos elementos estruturais de MLC. Ohnesorge et al. (2010), ao analisarem seus resultados experimentais, constataram a influência da espessura das lamelas e do tempo total de fabricação como fatores determinantes para fornecer uma satisfatória durabilidade da adesão entre o adesivo de melamina-uréia-formaldeído e a madeira de *Fagus sylvatica* L. As amostras com lamelas com espessura de 38 mm, principalmente as produzidas na indústria, apresentaram uma maior delaminação quando comparada com as amostras com espessura de 29 mm e 35 mm. Os autores concluíram, também, que a elevação do tempo de montagem fechado melhora a durabilidade do adesivo.

Um problema recorrente no uso dos adesivos nos elementos estruturais engenheirados de madeira relatado na literatura é o ambiente de instalação das peças, que interfere no emprego de alguns tipos de adesivos devido, principalmente, à redução da vida útil da adesão entre os materiais provocados pelo contato direto com a chuva e as variações climáticas. Dessa maneira, Raknes (1997) avaliou experimentalmente a durabilidade e a resistência dos adesivos mais utilizados na produção da madeira estrutural de coníferas da sua época, *Fagus sylvatica* e *Picea abies*. As análises mostraram que as resinas à base de caseína e de uréia-formaldeído possuem um bom desempenho quando a estrutura está posicionada em recintos internos e protegida em ambientes mais severos. Por outro lado, os adesivos feitos de resorcinol e de fenol-resorcinol podem ser aplicados em qualquer tipo de situação.

A norma europeia EN 301:2013 determina três níveis de classe de serviço para a exposição do adesivo, Tabela 2.1. Cada classe possui um determinado tipo de adesivo que pode ser empregado no elemento estrutural e o máximo teor de umidade, a uma temperatura de 20 °C, que pode acontecer somente em algumas semanas durante o ano.

Tabela 2.1 – Classes de serviço dos elementos estruturais de madeira colada

Classe de serviço	Ambiente de exposição	Teor de Umidade	Tipo de Adesivo
1	Interno	65	I e II
2	Externo protegido	85	I
3	Externo	> Classe de serviço 2	I

Fonte: EN 301:2013

Segundo a norma EN 301:2013, para os materiais feitos com coníferas, a média do teor de umidade no ambiente de exposição não pode ser maior do que 12% e 20% para classe de serviço 1 e 2, respectivamente.

2.1 Características da madeira ligadas à colagem

2.1.1 Densidade

A densidade da madeira está associada com a espessura da parede celular e a quantidade de poros do material. O aumento dessa propriedade física até a faixa de 700 kg/m³ a 800 kg/m³ acarreta uma maior solicitação da linha de cola. Com isso, a porcentagem de falha no adesivo também é aumentada. A utilização de madeira com densidade superior a essa faixa provoca uma redução da capacidade do adesivo de resistir aos esforços. Além disso, a madeira mais densa prejudica a penetração do adesivo provocando a diminuição do preenchimento das células necessária para obter uma melhor ancoragem da resina (VICK, 1999).

Follrich et al. (2008) pesquisaram o efeito da densidade da *Picea abies* Karst. no desempenho do adesivo à base de melamina-uréia-formaldeído perante a resistência à tração. Os autores mostraram que a elevação da densidade dessa madeira proporciona uma melhora na ligação do material. Um dos motivos para esse aumento está associado com a espessura mais grossa da parede celular das amostras mais densas, pois a ligação nessa região tem uma maior resistência coesiva. A maior penetração em madeiras leves dessa espécie, ocasionada pela maior concentração de poros, não influenciou no desempenho desse adesivo.

2.1.2 Extrativos

A presença de extrativos nas árvores abrange todas as espécies, porém cada uma possui suas próprias composições e quantidades, que variam internamente dependendo da região do lenho. Essas substâncias proporcionam mudanças nas propriedades da superfície da madeira e, desse modo, a adesão desse material também é perturbada. A quantidade de extrativos existentes nas faces da madeira provoca alterações na força coesiva das resinas (HSE; KUO, 1988).

De acordo com Plomley et al. (1976), os taninos hidrolisáveis, presentes em determinadas espécies de madeira, podem comprometer o desempenho da colagem dos adesivos à base de fenol-formaldeído mesmo estando em baixa concentração nas faces do substrato. Todavia, o enfraquecimento da adesão entre as peças de madeira não é muito prejudicado por essa composição, provavelmente, devido à sua presença nessas localidades estarem abaixo do valor crítico.

Moredo Jr e Sakuno (1991) mostraram, em sua pesquisa, a queda da força de cisalhamento das linhas de cola de resorcinol-formaldeído, polivinil acetato e emulsão polimérica de isocianato motivada pelo acréscimo de extrativos na madeira de *Dipterocarpus spp.* Os pesquisadores observaram que, ao inserir extrativos obtidos da madeira de *Dipterocarpus spp.* na composição desses adesivos, houve uma demora em atingir a resistência da linha de cola na madeira de *Fagus crenata* ou uma redução no desempenho da colagem.

Conforme Lima et al. (2007), o desempenho da colagem de clones de *Eucalyptus urophylla* com uréia-formaldeído depende da quantidade de extrativos presentes nessa matéria-prima. Assim além de alterar a resistência ao cisalhamento, a sua concentração nesse substrato também modifica a porcentagem de ruptura do adesivo. Albino et al. (2012) determinaram a concentração de extrativos presentes no *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e seus efeitos na resistência da linha de cola constituída de resorcinol-formaldeído. Os autores observaram uma elevação da quantidade dessas substâncias na direção da medula para a casca dessa espécie. Para os pesquisadores, houve uma melhora no desempenho da propriedade mecânica estudada nas amostras com maiores concentrações de extrativos. Esse fenômeno foi explicado pela prensagem a frio do material que não permitiu o deslocamento dos extrativos para as faces aonde foi aplicado o adesivo.

2.1.3 Permeabilidade

De acordo com Comstock e Côte Jr (1968), a fluidez de um determinado líquido no interior da madeira representa o conceito de permeabilidade dessa matéria-prima. Conforme Comstock (1970), as diferentes características da madeira nas suas principais direções estruturais conduzem a maiores disparidades na permeabilidade desse material. Nesse contexto, em determinadas espécies de madeira a direção longitudinal apresenta uma permeabilidade muito superior à direção tangencial e radial. Essa discrepância pode estar

relacionada com a parede celular, como também, com o papel desempenhado pelas células durante a vida da árvore.

Choong et al. (1974) investigaram a permeabilidade do gás em várias espécies de folhosas retiradas em alguns estados americanos. Os pesquisadores encontraram diferenças dessa propriedade entre o eixo longitudinal e o plano transversal. Todavia, os eixos radial e tangencial foram equivalentes. Na direção longitudinal, o fluxo do gás foi modificado através da região do lenho e do teor de umidade, enquanto em todas as direções as distinções ocorreram entre as espécies e dentro da mesma espécie de madeira. O líquido possuiu maior dificuldade de fluir do que o gás no eixo longitudinal.

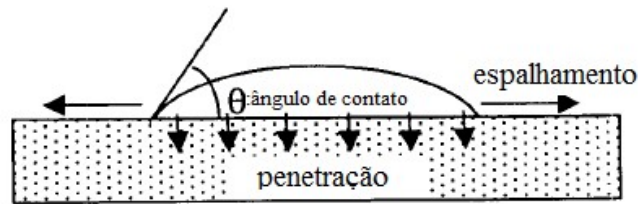
As regiões de albarno e cerne, provenientes da mesma árvore de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus citriodora*, possuíram distintas taxas de permeabilidade em seu interior. Essa propriedade estava associada ao grau de porosidade e à obstrução dos vasos provocada pela expansão da parede celular, além da quantidade de extrativo presente nessa localidade. Dessa maneira, o cerne forneceu uma maior dificuldade na passagem do fluido do que o albarno devido à sua baixa porosidade e ao maior fechamento dos vasos. A permeabilidade, nessas espécies de madeira, também foi afetada pela a direção da penetração do líquido, sendo a direção longitudinal da madeira mais eficiente do que a radial (SILVA et al., 2010).

2.1.4 Molhabilidade

Conforme Baier et al. (1968), a propriedade de molhagem para um material pode ser descrita como a distribuição de um determinado líquido nas faces de um aderente que ocorre simultaneamente com a adesão entre o material e o líquido.

O processo de molhagem das faces da madeira pelo adesivo ocorre por meio de três fenômenos: produção de um ângulo de contato devido à interação do adesivo com o substrato, a distribuição do adesivo na face do aderente e a penetração do mesmo no interior do material, Figura 2.1. A inclinação da gota é reduzida através da duração de contato entre os materiais. Essa diminuição está relacionada com os dois últimos fenômenos mencionados. Essa propriedade da madeira pode ser alterada pela a direção das fibras e região do lenho (SHI; GARDNER, 2001).

Figura 2.1 - Molhabilidade da superfície do aderente



Fonte: Adaptado de Shi e Gardner (2001)

Scheikl e Dunky (1998) usaram uréia-formaldeído e *Pinus silvestris L.* para mostrarem os diferentes ângulos de contatos desenvolvidos nas superfícies de alborno e cerne. Os pesquisadores perceberam uma melhor penetração do adesivo na região do alborno devido à redução maior da inclinação e do volume da gota em função do tempo. Isso aconteceu porque essa região tinha uma elevada concentração de poros e um maior tamanho das células das faces. Para os autores, duas características dos adesivos, viscosidade e tamanho da partícula, interferiu consideravelmente na molhagem do substrato e na sua capacidade de adentrar no interior da madeira. Dessa maneira, concluíram que o aumento desses parâmetros acarreta um fluxo menor de penetração dentro do substrato.

Shupe et al. (2001) estudaram alguns parâmetros que provocam alteração da molhagem do adesivo à base de fenol-formaldeído nas faces do aderente, sendo esses o tipo de madeira (22 espécies distintas de folhosas), acabamento da superfície (lixadas e não lixadas), tipo de secagem de algumas dessas espécies (estufa, ambiente, congelamento) e plano da madeira (transversal e tangencial). Segundo os autores, as espécies estudadas apresentaram relevante distinção no ângulo de contato do adesivo devido à composição química e a anatomia de cada árvore. Além disso, os pesquisadores notaram um aumento da inclinação provocada pelo o lixamento das faces e no plano transversal do substrato. Assim, esses parâmetros influenciaram na penetração e no espalhamento inicial do adesivo nessas espécies de madeira. O melhor método de secagem para a molhagem do material foi observado para o resfriamento por causa do baixo ângulo de contato nas médias de todos os planos das quatro árvores analisadas.

2.2 Tipos de adesivos

Nas últimas décadas houve uma dificuldade em se determinar o tipo de adesivo mais apropriado para ser utilizado nos produtos engenheirados de madeira, pois os fatores que

impactam essa escolha são o valor do produto, a resistência da linha de cola, suas propriedades mecânicas, sua facilidade de aplicação, seu uso externo ou interno e sua vida útil (RAKNES, 1997; FRIHART, 2005).

Lehmann et al. (2016) analisaram experimentalmente o desempenho da adesão entre as lamelas de madeira da espécie *Fraxinus excelsior L.* Em seu estudo, as amostras foram produzidas com seis diferentes tipos de adesivos: dois tipos de melamina-uréia-formaldeído, um fenol-resorcinol-formaldeído, uma emulsão de polímero de isocianato e dois poliuretanos. Alguns parâmetros como tempo de montagem, tipo de acabamento da superfície e quantidade de endurecedor, foram analisados pelos autores. Os autores observaram que o único adesivo que apresentou bom desempenho perante o cisalhamento úmido foi fenol-resorcinol-formaldeído, enquanto os outros não passaram nos testes de delaminação e nem de cisalhamento em condição úmida. Em um adesivo de melamina-uréia-formaldeído, houve uma melhora na adesão quando a quantidade de endurecedor era menor e o tempo de montagem fechado era maior.

No mercado mundial, existem diversos tipos de adesivos que são destinados à colagem da madeira. As principais colas aplicadas na fabricação das peças estruturais laminadas são: uréia-formaldeído, caseínas, melamina-uréia-formaldeído, melamina-formaldeído, resorcinol-formaldeído, fenol-resorcinol-formaldeído e fenol-formaldeído (DUNKY, 2003; DAVIS, 1997).

2.2.1 Melamina-uréia-formaldeído (MUF)

Os adesivos à base de melamina-uréia-formaldeído possuem adequado desempenho em contato com a água. Dessa maneira, os produtos manufaturados com essas resinas, madeira compensada e painéis de partícula, podem ser destinados a ambientes sujeitos a exposição de água (PIZZI, 2003). Esses adesivos são sintetizados através das reações químicas entre os três componentes principais do produto e, ainda, são considerados representantes do grupo de polímeros termofixos (AZAMBUJA, 2006). Na produção de elementos estruturais de MLC, somente é utilizado cura em temperatura ambiente para o adesivo de MUF.

2.2.2 Poliuretano

A principal característica de um adesivo à base de poliuretano é a formação de uretanos após o processo de cura. A síntese dessa substância ocorre por meio da reação química entre um grupo de hidroxilo e o isocianato (AGGER, 1984). Esses adesivos permitem alterações em sua composição química e, em vista disso, uma variedade de diferentes tipos de poliuretanos foi desenvolvida. Todavia, a maioria dessas resinas pode ser enquadrada em dois principais grupos: poliuretano monocomponente e poliuretano bicomponente (STROBECH, 1990).

O poliuretano garante uma boa aderência entre os materiais colados, uma considerável rigidez, satisfatória resistência química, além de uma boa resistência à água. Essas características aliadas à sua facilidade de se adaptar a determinados substratos permitem a sua aplicação em distintos segmentos da indústria como, por exemplo, nas obras de madeira e nas obras de aço. A cura desse adesivo pode ser feita em temperaturas elevadas ou em temperatura ambiente dependendo do tipo do adesivo (STROBECH, 1990). Na produção de MLC, a cura do adesivo é feita somente em temperatura ambiente para esse tipo de adesivo.

2.2.3 Adesivos fenólicos

O surgimento no mercado dos polímeros sintéticos aconteceu, primeiramente, por meio das resinas fenólicas, no início do século XX. Esses adesivos são originados da reação química entre o fenol e o formaldeído. A linha de cola formada por essa resina consegue fornecer um desempenho satisfatório na presença de água, em elevadas temperaturas e em condições climáticas, sem grandes gastos. Na indústria da madeira um representante desses adesivos é o fenol-formaldeído que são empregados, basicamente, na produção de madeira compensada e em painéis de partícula destinados a ambientes externos, devido ao seu satisfatório desempenho na presença de água. Esse adesivo possui PH básico e antes de sua cura, em elevadas temperaturas, recebe aditivos em sua composição. A linha de cola formada apresenta, na maioria das vezes, coloração amarronzada (PIZZI, 2003). Em algumas empresas de LVL são usadas colas fenólicas com a cura sendo feita em temperatura elevada. Por outro lado, na indústria de MLC e na maioria das de LVL, a cura desse adesivo é feito em temperatura ambiente.

3 MADEIRA LAMINADA COLADA

A combinação entre a cola e a madeira ocasionou o surgimento de vários produtos engenheirados de madeira colada. Um dos primeiros produtos criado pela humanidade utilizando essa tecnologia foi a madeira laminada colada (MLC) para fim estrutural (STARK et al., 2010). No mundo, a primeira obra de grande importância que utilizou esse conhecimento foi um auditório localizado na cidade de Basileia, na Suíça, no ano de 1893. Na época, a técnica ficou conhecida como “*Hertzer System*” devido à sua patente. Nesse período, esses elementos estruturais eram destinados a recintos fechados e protegidos da chuva em virtude do adesivo à base de caseína não ser a prova de água (MOODY et al., 1999).

No *Forest Products Laboratory*, foi edificado um galpão usando elementos estruturais de MLC com curvatura. Essa edificação é considerada uma das pioneiras no mundo a empregar esse tipo de forma geométrica aliada aos conceitos de engenharia, sendo que a obra foi concluída na década de 1930, na cidade de Madison, Wisconsin, Estados Unidos (MOODY et al., 1999).

Os conhecimentos trazidos da Alemanha sobre a MLC ocasionaram à primeira produção desses materiais no Brasil. A empresa responsável por esse desenvolvimento foi a ESMARA Estruturas de Madeira Ltda., localizada na época na capital paranaense e fundada no ano de 1934. Em seguida, houve o surgimento de uma nova empresa, com o mesmo nome da anterior, construída no estado do Rio Grande do Sul. Com o passar dos anos, algumas novas empresas foram criadas, nas regiões sul e sudeste do país, a fim de tentar disseminar, nas construções, essa nova tecnologia (ZANGIÁCOMO, 2003).

Nos países europeus, no Canadá e nos Estados Unidos, os elementos estruturais de MLC vêm sendo aplicados na construção civil há vários anos. Uma alternativa para a fabricação desse produto é a utilização de lamelas provenientes de árvores jovens. A MLC feita a partir dessas madeiras possui uma elevada resistência e permite construir grandes vãos. Essas características também são fornecidas por árvores mais velhas. Todavia, no momento atual, a dependência do emprego dessa matéria-prima para a produção de elementos estruturais não é mais necessária (YANG et al., 2008).

No mercado brasileiro existem poucas indústrias produtoras de elementos estruturais feitos de MLC. Em vista disso, o preço desse produto ainda é muito elevado, predominando

assim, a utilização de madeira serrada oriunda de florestas plantadas e de florestas tropicais na construção civil nacional (CALIL NETO, 2011).

Algumas das principais características dos elementos estruturais de MLC segundo Freas (1949) são: utilização de madeira de dimensões comerciais para fabricar estruturas capazes de alcançar grandes vãos, criação de edificações com geometria não convencional, aplicação em ambientes internos para fins de decoração, tensões internas desenvolvidas na estrutura provocam a alteração da seção transversal por toda sua extensão e nas áreas onde as lamelas são menos solicitadas (regiões centrais) pode-se utilizar peças de madeira serrada com qualidade inferior sem o risco de ocasionar danos às condições finais de uso do elemento estrutural.

Além disso, o uso da MLC ajuda a combater o desmatamento de espécies nativas brasileiras por utilizar em sua produção madeira de florestas plantadas. Esse material é empregado em diversas obras de engenharia, tais como: coberturas, casas, passarelas, pontes, portais e outras edificações (Figura 3.1).

Figura 3.1 - Vista de uma grelha feita de MLC no Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo



Fonte: o autor

3.1 Características das lamelas para a produção do MLC

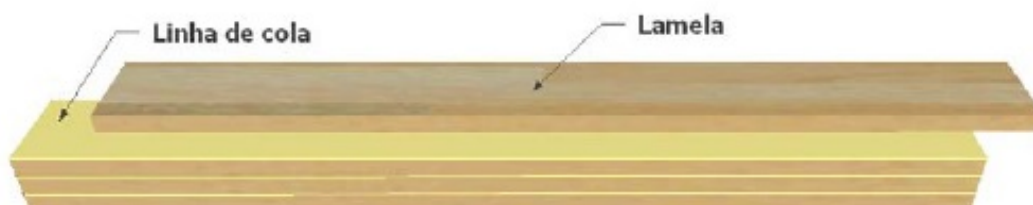
A matéria-prima necessária para a produção das lamelas nas indústrias da MLC é proveniente das espécies de coníferas e dicotiledôneas de florestas plantadas, sendo no Brasil,

as principais espécies os pinus e os eucaliptos. Como o país possui uma vasta área de floresta tropical, pesquisas foram desenvolvidas com o intuito de avaliar as propriedades mecânicas da MLC produzida com madeiras da floresta Amazônica. As espécies estudadas apresentaram resultados satisfatórios para serem usadas na linha de produção das empresas brasileiras, como, por exemplo, a *Erismia uncinatum* Warm e a *Goupia glabra* Aubl. (MACÊDO et al., 2000; MACÊDO et al., 2008; REIS; JESUS, 2008).

Segundo Serrano (2003), a escolha do melhor gênero para ser empregado nesses elementos estruturais depende da facilidade da colagem e, por essa razão, as coníferas são as mais preferidas pelas fábricas. De acordo com Icimoto (2013), essa vantagem pode ser explicada pelo fato dos adesivos apresentarem uma melhor penetração e interação com esse tipo de madeira.

Os elementos estruturais de MLC são compostos por tábuas de madeira serrada, conhecidas por lamelas, unidas por adesivos estruturais específicos. Para a formação dos elementos estruturais retos ou curvos, as fibras de cada lamela devem estar sempre alinhadas no mesmo sentido do seu eixo longitudinal. Além disso, cada camada é formada por lamelas com a mesma espessura que varia entre 2,5 cm a 5 cm (STARK et al., 2010). Um benefício da utilização das lamelas está associado com a retirada dos defeitos que são responsáveis pela diminuição da sua resistência e da sua rigidez. Dessa maneira, a MLC produzida por esse material consegue ter melhores propriedades mecânicas do que a madeira sólida (SENA-CRUZ et al., 2012). A Figura 3.2 ilustra uma viga e seus principais componentes.

Figura 3.2 - Componentes principais que formam o elemento estrutural de MLC



Fonte: Icimoto (2013)

Segundo Azambuja et al. (2004), uma propriedade física da madeira importante na produção da MLC é sua densidade a 12%. Os autores recomendam que ela esteja dentro da faixa de 400 a 750 kg/m³ para que a adesão seja adequada. Caso o material apresente valores superiores, devem ser realizados estudos de viabilidade, uma vez que, a resistência da ligação, entre a madeira e o adesivo, pode não ser satisfatória.

A umidade da madeira é outra característica que deve ser observada. As lamelas que compõem a MLC, na maioria das aplicações na indústria, devem conter um teor de umidade entre 10 a 16% (ISSA; KMEID, 2004). Na formação do elemento estrutural é necessário verificar a diferença de umidade entre as lamelas. Esta deve ser inferior a 5% para que não ocorram processos diferentes de inchamento e de retratilidade. Para atingir esse teor, as lamelas passam por um processo de secagem realizado, normalmente, em estufas com temperatura e pressão controladas (MOODY et al., 1999).

3.2 Classificação e distribuição das lamelas

O uso de ensaios não destrutivos auxilia na classificação prévia das peças de madeira para serem distribuídas no elemento estrutural, conforme suas propriedades mecânicas. Dessa maneira, o material avaliado, na maioria dos casos, não sofre nenhum tipo de dano e pode, perfeitamente, ser utilizado logo a após sua classificação. As principais técnicas usadas nas indústrias da madeira que permitem fazer essa análise são: classificação visual, ultrassom, vibração transversal e ondas de tensão (SALES et al., 2010).

Os esforços de tração e compressão presentes durante a vida útil de vigas de MLC determinam a disposição das lamelas em torno de sua altura. Para um melhor aproveitamento da matéria-prima, nas extremidades do elemento estrutural onde ocorrem as maiores solicitações devem ser utilizados lamelas de madeira que possuem as melhores propriedades mecânicas normais. Por outro lado, nas proximidades da linha neutra, o uso de lamelas de qualidade inferior é apropriado, pois não causam problemas para o elemento estrutural (LAM; PRION, 2003; APA, 2008).

3.3 Emendas dentadas

Muitos elementos estruturais de MLC necessitam, nas suas aplicações, vencer grandes vãos e, por essa razão, as camadas das peças são compostas por várias lamelas. Nas regiões de contato entre as extremidades da madeira é necessário fazer o uso de emendas longitudinais, pois as lamelas não possuem o mesmo comprimento do elemento estrutural. Essas ligações podem ser de três tipos distintos: topo, biselada ou emendas dentadas. Todavia a ligação mais utilizada na indústria é a terceira, conhecida internacionalmente como *fingerjoints*, Figura 3.3 (STARK et al., 2010; BODIG; JAYNE, 1982). Nas indústrias, o processo de fabricação das emendas dentadas está diretamente ligado com a eficiência da união. Para essa ligação

conseguir atingir uma resistência de até 75% da madeira serrada sem defeitos, de várias espécies, o processo tem que ser preciso e de qualidade (MOODY et al., 1999).

Figura 3.3 - Emenda dentada



Fonte: o autor

Ayarkwa et al. (2000), em sua pesquisa experimental, analisou o efeito de diferentes dimensões de produção combinadas com distintas pressões de colagem na resistência a tração e no MOE das emendas dentadas. Os corpos de prova sem emendas dentadas e com emendas dentadas foram produzidos com três espécies de madeira livre de defeitos: *Triplochiton seleroxylon*, *Tieghemella heckelli* e *Baillonella toxisperma*. O estudo mostrou que, caso seja aplicado na produção uma força maior do que a necessária, a região da ligação pode sofrer danos permanentes nas raízes dos dentes provocados pela força de compressão. Desse modo, existe uma redução da capacidade da emenda para resistir aos esforços de tração. Além disso, os autores notaram que as dimensões das emendas provocaram alterações significativas na resistência da ligação. A modificação dos parâmetros de produção estudados não provocou nenhuma mudança no MOE das emendas dentadas.

Özçifçi e Yapici (2008) estudaram as influências de diversos parâmetros no MOR e no MOE das emendas dentadas, a partir da utilização dos seguintes tipos de madeira (*Fagus orientalis lipsky*, *Pinus sylvestris lipsky*, *Populus tremula lipsk* e *Abies bormülleriana Matff*), tipo de adesivo (polivinil acetato e poliuretano), comprimento da emenda (7, 14 e 21 cm) e a direção da madeira (tangencial e radial). Segundo os pesquisadores, houve uma melhora na

resistência à ruptura para as amostras com maiores comprimentos de emendas ($21 > 14 > 7$). Esse aumento se deu ao fato das ligações terem uma maior área de contato do adesivo com a madeira. Além disso, o tipo da madeira utilizada influenciou também no MOR da peça, enquanto não houveram diferenças nessas propriedades devido à utilização do adesivo e nem da direção da madeira.

Pereira et al. (2016) pesquisaram o comportamento a tração das emendas dentadas com 21 cm de comprimento produzidas por meio da combinação do adesivo poliuretano com uma madeira oriunda do cruzamento genético entre o *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. A eficiência desse material foi de apenas 47,72% em relação às amostras sem emendas para o valor característico de tração, sendo o principal motivo dessa inferioridade, a descontinuidade das fibras provocadas por essas ligações. De acordo com os autores, o aumento da densidade representou uma melhora na capacidade dessas uniões de resistir a essa sollicitação.

Conforme a norma EN 385:2002, a pressão necessária para produzir as emendas dentadas de coníferas varia de 2N/mm^2 a 10N/mm^2 . Todavia o valor dessa pressão depende do comprimento dos dentes. De acordo com o projeto de revisão da norma brasileira ABNT NBR 7190:2013, na produção das vigas de MLC, a disposição entre as emendas dentadas de camadas vizinhas devem ser planejadas para se obter um espaçamento mínimo de pelo menos 20 cm nas regiões com uma distância de um quarto da altura da viga em relação à linha neutra. Além disso, na mesma camada, perto da região central, as emendas devem estar distanciadas de pelo menos 50 cm e perto da extremidade do elemento estrutural essa distância deve ser 80 cm.

3.4 Cura do adesivo

Uma das etapas de montagem da MLC passa pelo processo de aplicação do adesivo nas superfícies das camadas. A peça unida pelos dois materiais deve ser colocada em uma prensa capaz de fornecer uma pressão maior do que 0,7 MPa para realizar a cura da cola. Além disso, o endurecimento deve ser feito seguindo as recomendações do fabricante do para garantir a qualidade da linha de cola (LAM; PRION, 2003).

3.5 Estudos desenvolvidos sobre MLC

As pesquisas relacionadas à MLC estão presentes em vários países com a finalidade de melhorar o produto final. Um laboratório brasileiro de grande importância nessa área é o laboratório de madeira e de estruturas de madeira (LaMEM), pertencente a Universidade de São Paulo (USP), onde já foram desenvolvidos vários trabalhos de mestrado e doutorado.

Carrasco (1989) realizou um estudo detalhado referente às propriedades elásticas, as deformações e as tensões atuantes nas vigas de MLC. Além disso, o autor analisou alguns parâmetros de produção que alteram as propriedades mecânicas desse produto, sendo esses a quantidade de lamelas distribuída em sua altura, a distância entre as emendas e a posição das emendas. O autor constatou que a maior tensão de cisalhamento nas vigas estudadas ocorria na linha de cola abaixo da linha neutra da peça.

Bono (1996), em sua dissertação de mestrado, pesquisou sobre a situação e a utilização da MLC no Brasil e os aspectos de produção do material para ser empregado nos sistemas estruturais. Concluiu, após uma grande coleta de dados e uma vasta revisão bibliográfica, que a MLC possui grande potencial para ser usada na construção civil brasileira mesmo com a quantidade baixa de indústrias.

Macêdo (1996), em sua pesquisa experimental e teórica, utilizou dois tipos de madeira, *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*, para confeccionar amostras de madeira colada e madeira maciça. O estudo foi realizado, principalmente, para avaliar a eficiência das emendas dentadas produzidas com adesivo CASCOPHEN® RS-216-M por meio do ensaio de tração paralela às fibras proposto pela ABNT NBR 7190:1997. Para o autor, houve uma semelhança nas resistências características e médias entre as amostras com emendas dentadas e as maciças. Dessa maneira, as emendas dentadas feitas com 20 mm de comprimento com uma pressão de 0,80 KN/cm² para coníferas e 1,00 KN/cm² para dicotiledôneas foram adequadas para a confecção de elementos estruturais de MLC.

Jesus (2000) analisou o desempenho do adesivo de poliuretano, produzido a partir do óleo de mamona, para sua utilização nas empresas de MLC. O desempenho do produto foi verificado por meio dos ensaios estabelecidos na ABNT NBR 7190:1997 para madeira colada. O pesquisador confeccionou suas amostras com madeiras de *Pinus caribea hondurensis* e *Eucalyptus grandis*. Após a avaliação da influência dos seguintes fatores na performance do adesivo: tempo de cura, viscosidade, pressão e tempo de prensagem, o autor apontou que esse adesivo estava apto para ser aplicado na produção de elementos estruturais de MLC com matéria-prima proveniente de florestas plantadas.

Macêdo (2000) pesquisou a fadiga das emendas dentadas desencadeada por diferentes cargas de carregamentos cíclicos e níveis de frequência. Para realização de sua pesquisa, os corpos de prova foram confeccionados com as espécies de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribea hondurensis* e colados com adesivo do tipo fenol-resorcinol ou com o adesivo de poliuretano à base de mamona. O autor verificou que a alteração do MOE das emendas dentadas não estava relacionada com a quantidade de ciclos aplicados no corpo de prova. Além disso, propôs coeficientes de redução para as emendas dentadas em relação à resistência à fadiga da madeira maciça analisada.

Azambuja (2002), em sua pesquisa experimental, pesquisou o potencial da aplicação do adesivo de poliuretano à base de mamona, composta de poliól 25040 e um pré-polímero A249, nas empresas de elementos estruturais de MLC. Para a confecção dos corpos de prova para os ensaios estabelecidos na ABNT NBR 7190:1997, o autor escolheu o *Pinus caribea hondurensis* sem tratamento químico e com tratamento químico de arseniato de cobre cromatado. Além disso, vigas de *Pinus caribea hondurensis* e *Eucalyptus grandis* foram produzidas para realização do ensaio de flexão estática a quatro pontos baseada na ASTM D198. Após o extenso programa experimental, o autor conclui que o adesivo de mamona pode ser, perfeitamente, aplicado nas fábricas de MLC.

Zangiácomo (2003) avaliou as espécies brasileiras de madeira tropical: cedrinho, castanheira, cambará e envira branca, como alternativas para a fabricação de elementos estruturais de MLC conforme os parâmetros de ensaio descritos pela ABNT NBR 7190:1997. Com base no potencial apresentado pelo cedrinho nos ensaios preliminares, o autor decidiu produzir vigas de MLC com essa matéria-prima para determinar sua rigidez com os ensaios de ultra-som, flexão estática e vibração transversal. O pesquisador concluiu que é possível a produção de elementos estruturais de MLC com as combinações estudadas entre o adesivo e a madeira tropical, principalmente, com o cedrinho.

Fiorelli (2005) realizou um estudo, experimental e teórico, sobre vigas de MLC fabricadas com reforço de fibra de vidro e sem reforço. O autor criou um *software* de computador capaz de definir as tensões de momentos atuantes e o MOE na flexão desses elementos estruturais baseado na acoplação de alguns conceitos teóricos. Os dados coletados da análise experimental serviram de comparação para comprovar a eficácia do *software*. Para essa verificação, os elementos estruturais foram compostos de lamelas de *Pinus caribea var. hondurensis* coladas com fenol-resorcinol. Nas vigas produzidas com diferentes espessuras de reforço, a fixação desse material foi feita por meio do adesivo de epóxi. Além disso, o

pesquisador mostrou o bom desempenho desses adesivos quando submetidos a teste de delaminação.

Azambuja (2006) estudou, principalmente, o comportamento do adesivo de poliuretano à base de mamona, por meio de investigação experimental, para ser empregado na produção de elementos estruturais de MLC. Para a confecção dos corpos de prova e das vigas, o autor escolheu dois tipos de madeira: pinus e eucalipto. Ao comparar os resultados mecânicos entre esse adesivo com alguns adesivos comerciais, constatou que a cola à base de mamona atende os requisitos para ser utilizado nas indústrias de MLC.

Em seu trabalho, Miotto (2009) pesquisou, experimentalmente e numericamente, uma série de vigas de seção T composta de MLC em sua alma e de concreto em sua mesa. Em algumas almas foram usados reforços de fibra de carbono o que ocasionou um ganho de resistência das peças. A união entre o concreto e a madeira foi realizada por meio de conectores metálicos de cisalhamento por apresentarem comportamento satisfatório. Ao final de sua pesquisa, o autor sugeriu uma metodologia para realizar o dimensionamento desses elementos estruturais reforçados.

Calil Neto (2011), em sua pesquisa experimental, avaliou o desempenho da MLC com 18 combinações distintas entre espécie de madeira, adesivo e tratamento químico, usando a norma canadense CSA 112.10 para o ensaio de fluência e delaminação. As madeiras empregadas na pesquisa foram *Tectona grandis*, eucalipto *urograndis* e *Pinus oocarpa* que compõem cada elemento estrutural. Os adesivos aplicados nas superfícies das lamelas foram Purbond® HB S309 e Cascophen® RS-216 M. As vigas receberam tratamento químico preservativo com três produtos usados no mercado brasileiro. Após a realização dos ensaios de delaminação, fluência e de cisalhamento, o autor observou que a madeira pinus mostrou o melhor comportamento entre as espécies estudadas. Além disso, para o controle de qualidade da produção desse produto nacionalmente, o pesquisador destaca a utilização dos ensaios de delaminação e fluência desse documento normativo.

Icimoto (2013) propôs um dormente de MLC feito de *Pinus oocarpa* como alternativa aos dormentes maciços de madeira nativa. As lamelas foram tratadas com o agente químico arsenato de cobre cromatado e unidas entre si com o adesivo do tipo poliuretano. Os ensaios executados de acordo com a norma brasileira sobre dormentes comprovaram que esses elementos podem ser aplicados nas ferrovias brasileiras.

Cavalheiro (2014) pesquisou o potencial da aplicação da madeira de *Schizolobium amazonicum Herb.* como matéria-prima na confecção de MLC. Na sua pesquisa foram utilizados adesivos do tipo Cascophen® RS-216 M, melamina-uréia-formaldeído e Purbond®

HB S309, e as lamelas de madeira receberam tratamento químico de borato de cobre cromatado e arseniato de cobre cromatado. Concluiu que a madeira de *Schizolobium amazonicum Herb.* é uma boa alternativa de material para o uso nas empresas de MLC junto com os adesivos e os tratamentos químicos analisados.

Martins (2016) apresentou uma análise do desempenho dos elementos estruturais de MLC submetidas à ação do fogo através de uma abordagem numérica e experimental. Para a produção das vigas, a autora escolheu dois tipos de madeira: pinus e eucalipto, e em alguns elementos estruturais foram realizados tratamento químico. A autora constatou que a densidade da madeira está relacionada com a taxa de carbonização dos elementos estruturais. Dessa maneira, elementos de maior densidade apresentaram menor velocidade de carbonização da madeira.

Alguns estudos desenvolvidos em outros centros de pesquisa com a finalidade de entender o comportamento estrutural de vigas de MLC e dos parâmetros de produção que afetam a resistência desse produto são apresentados na sequência.

Parra-Serrano et al. (2012) pesquisaram, por meio de investigação experimental, a possibilidade do emprego da espécie de *Hevea Brasiliensis* como matéria-prima na confecção da MLC. Para a adesão das lamelas foi utilizado o adesivo monocomponente à base de poliuretano. O estudo analisou o MOR e o MOE através do ensaio de flexão em três pontos para o material supracitado e a resistência ao cisalhamento da linha de cola. Os pesquisadores concluíram que a seringueira é uma boa opção para ser usada na linha de produção das empresas de MLC junto com adesivo analisado.

Nadir e Nagarajan (2014) analisaram o comportamento mecânico e a durabilidade do adesivo das vigas de madeira laminada colada feitas com a madeira *Hevea Brasiliensis* unidas com acetato de polivinila. As vigas foram produzidas de cinco maneiras diferentes: madeira sólida, 3 camadas de lamelas de 20 mm de espessura cada, 4 camadas de lamelas de 15 mm de espessura, 6 camadas de lamelas com 10 mm de espessura e 4 camadas de lamelas de 15 mm de espessura com emendas dentadas. Segundo os pesquisadores, as espessuras das vigas não influenciaram estatisticamente nos valores dos MORs e dos MOEs. Além disso, houve uma redução da média do MOR devido à presença de emendas nas vigas. Porém o teste estatístico não apresentou diferenças significativas para esse resultado. Ademais, os autores fizeram ensaios de cisalhamento na linha de cola e delaminação para a adequação da combinação madeira e adesivo para fins estruturais.

Tran et al. (2016) utilizaram a madeira de carvalho combinado com o adesivo à base de melamina-uréia-formaldeído para produzir vigas de MLC com e sem emendas dentadas. O

estudo analisou o MOR e o MOE por meio do ensaio de flexão a quatro pontos para o material supracitado e para um conjunto de vigas maciças de carvalho. Segundo os autores, houve uma perda de resistência mecânica a flexão nas vigas com emendas dentadas devido à ruptura a tração iniciar nessas ligações, enquanto nos elementos estruturais sem emendas, os valores foram semelhantes aos das vigas de madeira sólida. Além disso, constataram que os MOE não foram alterados pela presença dessas uniões.

4 LAMINATED VENEER LUMBER

As pesquisas realizadas sobre LVL, na década de 1940, tinham como principal objetivo atender a indústria aeronáutica. Os pesquisadores utilizando a espécie de madeira *Stika spruce* desenvolveram laminados com elevada resistência para serem aplicados nas aeronaves (MOODY et al., 1999).

No mercado brasileiro, a fabricação em larga escala do LVL ainda não aconteceu e, por esse motivo, estudos sobre esse material são desenvolvidos no país. Como alternativa a esse problema, a manufatura desse produto pode ser realizada através das linhas de montagem das empresas de compensado (PALMA; BALLARIN, 2011).

Os produtos engenheirados de madeira fornecem vários benefícios perante a madeira serrada para fins estruturais. Conforme Molina et al. (2013), as vigas de LVL apresentam as seguintes vantagens: fabricação de elementos estruturais com maiores comprimentos e seções transversais, redução da presença de defeitos proporcionada por uma classificação da matéria-prima, melhor desempenho dos elementos estruturais devido à verificação prévia das propriedades mecânicas das lâminas e a utilização das lâminas proporciona a produção de vigas com formatos não tradicionais.

As obras de pequeno porte necessitam de produtos com uma boa resistência e pouca altura. Essas exigências conseguem ser atendidas por meio da aplicação do LVL. Ademais, esse laminado é destinado, principalmente, para os ambientes internos das edificações sendo encontrado na forma de vigas, nos banzos de treliça, nas vigas I e combinados com outros produtos engenheirados de madeira (VLOSKY et al., 1994). A Figura 4.1 mostra uma aplicação em áreas externas.

Figura 4.1 - Vista de uma cobertura com viga curva de LVL no laboratório de madeira e estruturas de madeira, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo



Fonte: o autor

4.1 Processo de produção de painéis *Laminated Veneer Lumber*

A escolha da matéria-prima usada pelas empresas pode influenciar o desempenho do produto. Cada painel fabricado com uma espécie de madeira tem suas próprias características físicas e mecânicas. Desse modo, pesquisas foram desenvolvidas com a intenção de verificar a performance do LVL feito com várias espécies não convencionais. Algumas espécies nativas e de reflorestamento estudadas apresentaram grande potencial para serem empregadas na linha de produção das empresas como, por exemplo, a *Schizolobium amazonicum*, *Brosimum parinarioides* Ducke e os clones de *Eucalyptus urophylla* (CARVALHO et al., 2004; IWAKIRI et al., 2010; LIMA et al., 2013; GUIMARÃES et al., 2015).

O cozimento dos troncos é um processo realizado antes da retirada das lâminas por meio de câmaras de vapor ou da imersão em tanques com água aquecida. Na produção de laminados, a escolha entre esses tratamentos depende dos procedimentos operacionais e dos aspectos relativos à segurança e do número de funcionários. Todavia, o tratamento mais usual na indústria é o aquecimento em tanques de água quente. O cozimento dos troncos diminui o tempo de secagem e melhora o desempenho do torno na produção de lâminas com menos imperfeições e na retirada de lâminas espessas dos troncos de madeira (LUTZ, 1978).

As empresas de LVL possuem o mesmo processo de fabricação do que as fábricas de madeira compensada. A diferenciação do LVL ocorre no posicionamento paralelo de todas as suas lâminas. As toras de madeira recebidas nessas indústrias são desenroladas em torno desenrolador para produzir folhas com espessura entre 2,5 mm e 4,8 mm para suas aplicações. Esse procedimento garante um melhor aproveitamento da matéria-prima quando confrontado com o desperdício gerado pelos cortes para a obtenção da madeira serrada. A uniformidade do desempenho do LVL e a facilidade de se trabalhar com esse material abriu espaço para ser aplicado nas fábricas moveleiras na criação de produtos com elementos curvilíneos (LAUFENBERG, 1983; LAM; PRION, 2003).

A continuação do processo de produção do LVL, após a retirada das lâminas, constitui de várias etapas. Primeiramente, ocorre à secagem dos laminados para que todos tenham o mesmo teor de umidade. Em seguida, o material passa por uma inspeção visual para identificação dos possíveis defeitos e, também, pode ser realizada uma verificação das propriedades mecânicas através de métodos não destrutivos. Na sequência, as lâminas são cortadas nas dimensões exigidas para depois receberem em suas superfícies os adesivos específicos, sendo o fenol-formaldeído, a resina mais utilizada nessa indústria. Para atingir as medidas necessárias, emendas são feitas nas extremidades de cada laminado. Na etapa seguinte, várias camadas sobrepostas são prensadas sobre temperatura elevada para a formação do produto e para realizar o endurecimento do adesivo estrutural. Por último, o elemento estrutural é cortado nas dimensões pré-estabelecidas tomando precauções quanto a facilidade de operação do produto até as construções (LAM; PRION, 2003).

4.2 Aquecimento dos troncos de madeira

O vapor aplicado no amolecimento dos troncos, procedimento que antecede a retirada das lâminas, reduz de maneira significativa a densidade, a resistência ao impacto, a resistência a compressão e o MOR dos painéis de LVL feitos de *Picea sp.* A melhora dessas características ocorre quando não se utiliza o tratamento prévio de amolecimento (ÇOLAK et al., 2007). Em contraste, Lutz (1978) descreve que a diminuição da resistência à flexão e da rigidez só é perceptível quando a tora passa por um período prolongado em elevadas temperaturas durante o aquecimento, sendo as folhosas as mais prejudicadas por esse procedimento. Além disso, as empresas, para não causar um desgaste elevado nas facas do

torno desenrolador, optam pelo aquecimento das toras, assim o custo de manutenção desse equipamento é reduzido.

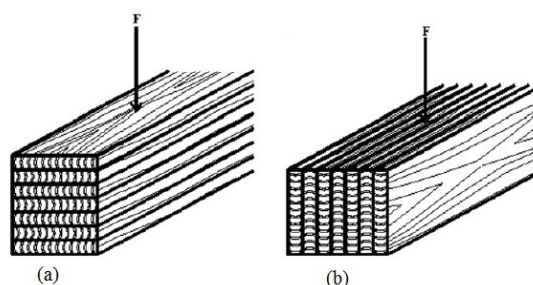
Caso as empresas optem por esse procedimento, o intervalo de tempo suficiente para o aquecimento dos troncos de *Fagus orientalis lipsky* depende da região de retirada das lâminas. O aumento da permanência em tanques de vapor, nessa etapa do processo, altera a rugosidade das peças extraída do cerne. Entretanto, na zona de alborno, essas propriedades não são afetadas por essa duração. Como as indústrias aproveitam o máximo das toras na produção das lâminas, o período de 20 horas de amolecimento é perfeito para obter o laminado com faces sem irregularidades para ambas as regiões do lenho (TANRITANIR et al., 2006).

Keinert Júnior e Alberto (1992), em sua pesquisa experimental, mostraram que a temperatura ideal das toras de *Pinus taeda* influência na resistência ao cisalhamento das linhas de cola a seco da madeira compensada unidas com adesivo fenólico. Para os autores, a temperatura de 60 °C de aquecimento dos troncos apresentou as melhores resistências ao cisalhamento.

4.3 Posicionamento das lâminas

Com relação ao posicionamento das lâminas, segundo várias pesquisas desenvolvidas, existem duas formas distintas de produção levando em consideração a inércia da seção transversal quando os elementos estruturais são retirados do mesmo painel. Nas vigas, essas são distribuídas na vertical (*edgewise*) ou na horizontal (*flatwise*) dependendo da direção do carregamento, Figura 4.2. Todavia cada posição pode conter características mecânicas próprias. Para Molina et al. (2013), a escolha da melhor configuração esbarra na forma de ruptura ocasionado pelo momento fletor. Neste contexto, a fabricação das vigas no formato horizontal fornece uma maior segurança nas construções devido à ruptura na tração ser menos frágil do que a ruptura da estrutura na outra direção.

Figura 4.2 - Posicionamento das lâminas em relação ao carregamento: (a) horizontal (b) vertical



Fonte: Burdurlu et al. (2007)

Palma e Ballarin (2011) publicaram um estudo sobre o desempenho dos painéis de LVL fabricados a partir da madeira de *Eucalyptus grandis*. As vigas extraídas desse produto foram pesquisadas com duas configurações distintas de posicionamento das lâminas, sendo uma distribuída na vertical e a outra na horizontal, e escolheram o adesivo à base de fenol-formaldeído na adesão das lâminas. O comportamento desse produto foi verificado através dos ensaios de flexão, compressão, cisalhamento e da densidade aparente determinado pelas normas americanas. Após as análises dos resultados, os autores observaram que o *Eucalyptus grandis* atende os requisitos necessários para serem utilizados como matéria-prima na produção de painéis de LVL. De acordo com os pesquisadores, o MOR não foi alterado em função da posição das lâminas, entretanto, houve uma diferença na rigidez das vigas.

Molina et al. (2013) estudaram o desempenho mecânico de vigas de LVL feitas de *Pinus oocarpa* através dos procedimentos de flexão estática e compressão descritos na ABNT NBR 7190:1997. Os autores relataram que as posições das lâminas, vertical ou horizontal, não alteram o MOE e MOR dos elementos estruturais, todavia foi observada uma diferença significativa na resistência a compressão, sendo a laminação horizontal a melhor configuração para essa solicitação.

4.4 Classificação das lâminas

A análise das madeiras através de uma série de métodos não destrutivos permite determinar algumas de suas características físicas e mecânicas sem provocar nenhuma modificação que inviabilize sua utilização posterior (ROSS, 2015). As lâminas, para formação dos elementos estruturais, podem ter seu desempenho e sua condição verificada por meio dos seguintes métodos: análise visual, ultrassom, flexão estática e ondas de tensão geradas por impacto (LAUFENBERG, 1983; BRASHAW, 2015).

Os produtos engenheirados de madeira feitos a partir de lâminas têm seu desempenho dependente das condições do laminado. Em vista disso, a mudança na qualidade desses produtos é fruto do processo produtivo, da escolha das lâminas e do gênero da madeira. Em relação às lâminas, o uso de métodos não destrutivos, ultrassom e ondas de tensão produzidas por impacto, permite identificar a presença de nós e a profundidade dos *lathe checks*. Entretanto, a utilização dessas técnicas depende da posição do aparelho em relação às fibras do laminado aliado com o tipo de defeito a ser identificado (WANG et al., 2001).

Palma et al. (2012) mostraram a melhora do MOE e do MOR na posição horizontal dos painéis de LVL de *Hevea brasiliensis* proporcionado por uma classificação prévia da rigidez dinâmica das lâminas. Segundo os autores, a análise na outra posição não revelou nenhuma melhora no desempenho do produto. Menezzi et al. (2013) utilizaram a mesma técnica para analisar os efeitos em algumas propriedades mecânicas do LVL devido à uma classificação preliminar dos laminados de *Schizolobium parahyba*. Os resultados apontaram uma melhoria da rigidez e do MOR do produto final nas duas posições, além de melhorar a resistência à compressão. De maneira oposta, Bortoletto Júnior (2010) verificou que a classificação prévia visual e não destrutiva não forneceu a melhora esperada no desempenho dos compensados feitos de *Pinus merkusii*. Os compensados feitos com lâminas sem classificação distribuídas aleatoriamente apresentaram qualidade igual ou superior aos compensados classificados antes da montagem.

A quantidade de água presente no interior das lâminas de *Pinus spp.* e de *Psuedotsuga menziesii* prejudicou significativamente a velocidade das ondas de tensão. A propagação nessas lâminas com elevado teor de umidade pode ser convertida para a condição seca através de relações lineares que englobam as duas situações. Com isso, o material não precisa passar por um processo de secagem para determinar suas propriedades mecânicas nas indústrias (BRASHAW et al., 2004).

4.5 Distribuição das lâminas

A combinação entre diferentes espécies de madeira e de distribuição das lâminas modifica as propriedades de resistência e rigidez do LVL. Para uma mesma combinação, a posição vertical ou horizontal das lâminas não possui muita interferência nessas características mecânicas do material. Além disso, o adesivo proporciona um aumento na densidade do material laminado constituído de uma única espécie quando comparado com a madeira sólida. Isso, também, pode resultar em uma melhora da rigidez e da flexão do produto final na posição horizontal (BURDURLU et al., 2007). De acordo com Özçifçi (2007), a maior quantidade de lâminas para uma mesma altura de um produto de LVL melhora sua densidade. Esse desempenho varia com o tipo de adesivo aplicado.

Iwakiri et al. (2010) analisaram a influência da distribuição das lâminas no desempenho dos painéis de LVL. Nessa pesquisa, as amostras foram fabricadas a partir de seis configurações distintas e com as lâminas oriundas do *Schizolobium amazonicum*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*. Os pesquisadores observaram que não houve modificação

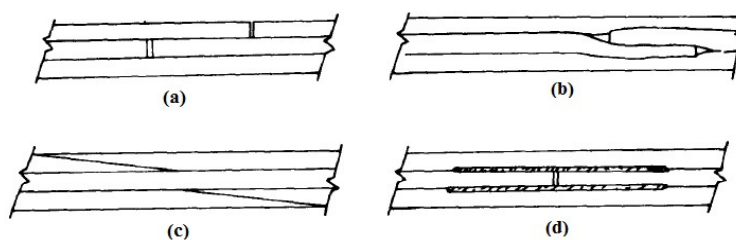
nos valores da rigidez e da resistência por uma classificação prévia das lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum*) para a posição vertical. Entretanto, melhoras consideráveis foram percebidas na posição horizontal. Segundo os autores, as extremidades com lâminas de melhores propriedades mecânicas, *Eucalyptus saligna*, favoreceu na elevação do desempenho dos painéis.

Müller et al. (2015), em sua pesquisa, verificou o comportamento de painéis de LVL, essencialmente, sobre flexão estática. As madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* foram as escolhidas para produção dos produtos com 6 tipos de configurações distintas e ensaiadas nas posições verticais e horizontais. Para esses autores, o posicionamento das lâminas interferiu nos resultados, sendo que a horizontal apresentou os melhores MOE e MOR.

4.6 Ligações das lâminas e dos painéis

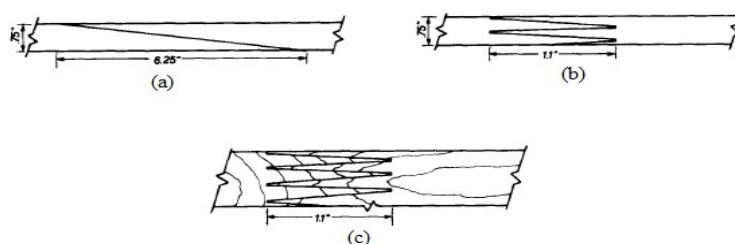
Os produtos de LVL utilizados na construção civil possuem, em algumas situações, comprimentos maiores do que um painel e uma lâmina. Para atingir essas dimensões, ligações nas extremidades desses produtos são necessárias. Nas lâminas, as junções podem ser do tipo: topo, biselada, topo com reforço e sobrepostas, Figura 4.3, enquanto nos painéis são mais comuns as biseladas, as emendas dentadas verticais e horizontais, Figura 4.4. (LAUFENBERG, 1983; YOUNGQUIST et al., 1984).

Figura 4.3 - Junções das lâminas: (a) topo (b) sobreposta (c) biselada (d) topo com reforço



Fonte: Laufenberg (1983)

Figura 4.4 - Ligações estruturais para painéis de LVL: (a) biselada (b) emenda dentada horizontal (c) emenda dentada vertical



Fonte: Laufenberg (1983)

Uma característica importante da madeira de Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*), para melhorar a resistência das ligações das lâminas, está associada com sua idade de corte. As árvores mais antigas, por possuírem anéis de crescimento mais próximos, fornecem a melhor resistência à tração do que as emendas feitas com madeira jovem. As ligações do tipo biselada produzidas com essa espécie, quando comparadas com as emendas dentadas, apresentam os melhores resultados para essa propriedade. Todavia todas essas ligações demonstram boa eficiência para serem usadas pelas indústrias (YOUNGQUIST et al., 1984).

O conhecimento dos fatores que alteram as propriedades mecânicas das emendas biseladas é fundamental para o desempenho do produto. Desse modo, um melhor MOE e MOR pode ser alcançado com a mudança de alguns parâmetros de produção como: o tipo de madeira, o ângulo de inclinação da emenda e, também, o tipo de adesivo (ÖZÇIFÇI, 2007).

5 NORMAS DE MÉTODOS DE ENSAIOS

Nessa seção, mostram-se os principais métodos de ensaios de outros países para avaliação dos elementos estruturais e das propriedades físicas e mecânicas dos adesivos estruturais usados na produção da MLC. Procurou-se expor algumas diferenças de cada procedimento quando comparados com os ensaios proposto no projeto de norma brasileiro ABNT NBR PN 02:126.10-001-5.

5.1 Normas canadenses

No Canadá, o controle de qualidade dos adesivos destinados à produção de elementos estruturais de MLC é feito por meio das normas CSA 112.9:2004 e a CSA 112.10:2007. O primeiro documento abrange os procedimentos necessários para avaliação da resistência dos adesivos expostos em ambientes externos, enquanto o segundo se limita a avaliação dos adesivos expostos em espaços com teor de umidade controlados. Os ensaios previstos para determinar as características da adesão entre os materiais são delaminação, cisalhamento na linha de cola e fluência.

O item 5 de ambas as normas descreve as características físicas e químicas das lamelas de madeira selecionadas para a confecção das amostras não retiradas de elementos estruturais e os procedimentos dos ensaios. As espécies de madeira destinadas a montagem dos corpos de prova são: *Acer saccharum*, *Acer nigrum*, *Pinus contorta var. latifolia*, *Picea mariana* e *Pseudotsunga menziesii*, sendo que a norma CSA 112.10:2004 só permite a utilização das espécies de coníferas supracitada.

Segundo as normas, na verificação da resistência ao cisalhamento das linhas de cola, o adesivo, para ser aprovado, deve passar por três ensaios diferentes. Essa distinção ocorre somente na preparação das amostras. Na primeira preparação, os corpos de prova devem ser colocados em um ambiente com uma umidade relativa de 65% e uma temperatura de 20°C até o seu peso próprio permanecer constante. Em seguida, realiza-se o ensaio de cisalhamento na linha de cola com essas amostras. Na segunda preparação, as amostras ficam submersas em água a 20°C dentro de uma autoclave para aplicação de um vácuo de 75 kPa por 30 minutos seguido por uma pressão de 540 kPa durante 2 horas. Na última preparação, o material é submerso em uma água fervente durante 4 horas, depois secado a uma temperatura de 60°C por um período de 19 horas e, finalmente, congelado em uma temperatura menor do que

-30°C durante 4 horas. Esse ciclo deve ser repetido mais sete vezes para avaliação dos adesivos expostos no exterior e mais duas vezes na condição interna.

Na CSA 112.09:2004, o ensaio de cisalhamento na linha de cola é feito com os corpos de prova úmidos após o término da preparação que envolve imersão em água. Por outro lado, na CSA 112.10:2007, esses materiais devem ser secos antes da realização do ensaio. Em ambas as normas, a tensão de cisalhamento em cada tipo de procedimento deve estar de acordo com os mínimos exigidos, assim como a porcentagem de falha na madeira.

No Canadá, a variação da temperatura entre as estações do ano é muito elevada. Por causa disso, o ensaio de cisalhamento prevê a situação final de solicitações que o adesivo e o elemento estrutural de MLC sofrerão ao longo de sua vida útil. Isso explica o procedimento rigoroso que é submetido às amostras.

Na análise da delaminação as duas normas possuem o mesmo procedimento de ensaio. De acordo com os documentos normativos, os corpos de prova submersos em água a $22\pm 5^\circ\text{C}$ dentro da autoclave, em um primeiro momento, são submetidos a um vácuo de 75 kPa por duas horas seguido por uma pressão de 540 kPa segurado durante 2 horas. Em seguida, outro ciclo de vácuo-pressão como anteriormente é realizado. Após essa etapa, as amostras são colocadas em estufa para secagem a $28\pm 2^\circ\text{C}$ com circulação de ar suficiente durante 88 horas. Além disso, todo esse processo descrito tem que ser realizado mais duas vezes. Assim, após 12 dias de ensaios, determina-se a porcentagem de delaminação das amostras.

O ensaio de fluência descrito na CSA 112.09:2004 e CSA 112.10:2007 consiste na confinamento das amostras em um dispositivo especial capaz de manter o carregamento de compressão aplicado inicialmente em qualquer máquina durante todo o tempo previsto para a realização completa do ensaio. Uma quantidade de amostras deve ser preparada para ser armazenada em cada condição de ambiente descrita nas normas após o carregamento do dispositivo. Ainda, a força de compressão aplicada depende do ambiente onde será colocado todo o conjunto. Para a norma CSA 112.09:2004, os ambientes de ensaios são A, B₁, B₂ e C e para a norma CSA 112.10:2007, os ambientes de ensaio são A, B₁, B₂, Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Ambientes para o confinamento dos dispositivos carregados

Ambiente de ensaio	A	B1	B2	C
Condição do ambiente após a aplicação da carga	durante 7 dias em uma temperatura de 20 e umidade relativa de 95%	durante 7 dias um mínimo de temperatura do ar de 70 e umidade ambiente	2 horas em um mínimo de temperatura do ar de 180 e umidade ambiente	28 dias sobre uma temperatura de 50 após as amostras serem protegida de perda de umidade

Fonte: CSA 112.09:2004, CSA 112.10:2007

5.2 Normas americanas

As normas americanas aplicadas à MLC são ASTM D 198:2014, D 2559:2004 e D 4688:2014. O MOR e o MOE são propriedades importantes das vigas de MLC que auxiliam no desenvolvimento de projetos estruturais. Essas características podem ser obtidas por meio do ensaio de flexão estático a quatro pontos descrito pela norma ASTM D 198:2014, intitulada como “*Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes*” e publicada no ano de 2014.

A norma ASTM D 2559:2004 tem como finalidade avaliar os adesivos aplicados entre as lamelas dos elementos estruturais de MLC destinadas a ambientes externos sujeitos a exposição de umidade. Dessa forma, é necessário fazer a análise das colas para garantir uma melhor eficiência, resistência e durabilidade do produto final. A norma mostra os métodos necessários para a validação dos adesivos que podem ser usados nessas condições. Os métodos de ensaios presentes nesse documento analisam a resistência ao cisalhamento na linha de cola, delaminação e a fluência sobre carregamento estático.

Nos procedimentos descritos pela ASTM D 2559:2004, as amostras podem ser confeccionadas a partir de qualquer espécie de madeira. Porém recomenda-se a utilização das madeiras mais usuais pela indústria americana. Ainda, na verificação da força de cisalhamento na linha de cola quando as espécies de madeira não são as recomendadas deve-se fazer o ensaio de cisalhamento na madeira sólida da espécie usada nessa análise. Além disso, as lamelas de madeira devem possuir as características físicas e mecânicas estabelecidas pela norma. Os corpos de prova usados nos procedimentos são extraídos e retirados de elementos estruturais com dimensões preestabelecidas, com destaque aos de cisalhamento que podem ser ensaiados com a configuração em degraus.

Na análise da delaminação da madeira na norma supracitada para ambientes exposto a umidade, as amostras submersas em água a uma temperatura entre 18°C a 27°C dentro de uma

autoclave são submetidas, inicialmente, a um vácuo de 85 kPa por 5 minutos seguido de pressão a 517 kPa por uma hora. Antes de ir para estufa, as amostras passam por outro ciclo de vácuo-pressão. Na estufa, a secagem ocorre a 65,5°C durante 21 a 22 horas. Após, realiza-se um ciclo com vapor a 100°C durante uma hora e meia, seguidamente, de uma pressão de 517 kPa aplicada nos corpos de prova submersos por 40 minutos e colocam-se as amostras em uma estufa para secar como anteriormente. Os dois ciclos iniciais e a secagem devem ser repetidos por mais uma vez para concluir o procedimento.

A aprovação do adesivo consiste em atender as condições mínimas satisfatórias de resistência ao cisalhamento, da porcentagem de falha na madeira e da porcentagem de abertura mínima permitido em cada linha de cola como exposto pela norma. Dessa maneira, as amostras feitas com coníferas devem ter uma delaminação menor do que 1%, enquanto as amostras de folhosas deve ter uma delaminação menor que 1,6%.

A resistência dos adesivos estruturais usados nas emendas dentadas é verificada através do documento normativo ASTM D 4688 – 14. O método consiste na verificação da tração das emendas dentadas sobre três situações distintas de preparação das amostras: seco, úmido após um ciclo de vácuo-pressão e úmido depois de cinco ciclos com água fervente.

De acordo com a norma ASTM D 4688 – 14, na linha de produção das empresas são retiradas as amostras isentas de defeitos em escala reduzida para a realização do ensaio, ou essas podem ser produzidas em laboratório. A norma ressalta que para o controle de qualidade as peças usadas devem ser iguais às produzidas pela as empresas.

O ensaio de fluência descrito na ASTM D 2559:2004 deve ser realizado conforme a ASTM D 3535: 2007. Nesta norma, o procedimento consiste na confinção das amostras em um dispositivo especial capaz de manter o carregamento de compressão de 1,655 MPa aplicado inicialmente em qualquer máquina durante todo o tempo previsto para a realização completa do ensaio. Uma quantidade de amostras deve ser preparada para ser armazenada em cada condição de ambiente descrita na norma após o carregamento do dispositivo. Uma das condições é o armazenamento em umidade ambiente durante 7 dias a uma temperatura de 71 °C e a outra é realizada em um ambiente com umidade relativa de 90% durante 7 dias a uma temperatura de 26,7 °C.

5.3 Normas europeias

No continente europeu, o controle de qualidade das linhas de colas nas empresas de MLC é feito por meio dos procedimentos apresentados na norma EN 14080:2013. Essa norma

descreve a metodologia necessária para a realização do ensaio de delaminação e de cisalhamento paralelo às fibras da madeira na linha de cola. Além disso, as amostras são retiradas de elementos estruturais, da mesma forma que o projeto de norma brasileiro ABNT NBR PN 02:126.10-001-5.

Na análise do cisalhamento conforme a EN 14080:2013, existe a possibilidade de analisar somente uma linha de cola com a extração de uma amostra cilíndrica do elemento estrutural para confeccionar o corpo de prova. O método consiste na aplicação de um carregamento uniforme até a ruptura da linha de cola. Após o ensaio, a porcentagem de falha na madeira deve ser medida e anotada.

Segundo a norma supracitada, o ambiente onde será exposto o adesivo influencia no tipo de procedimento que será adotado para analisar a delaminação. Por causa disso, existem três métodos distintos de avaliação nesse documento: Método A, B e C. O ciclo na autoclave é composto, principalmente, por um vácuo de 85 kPa seguido de uma pressão de 600 kPa. As amostras nesse ciclo devem estar submersas em água a uma temperatura de 22°C. Após o término do ciclo, as amostras são destinadas a uma estufa com velocidade do ar entre 2 m/s a 3m/s, além de uma temperatura e teor de umidade que depende do procedimento adotado.

No método A da EN 14080:2013 destinado para aprovação do adesivo como sendo do tipo II (EN 391:2001), Tabela 2.1, as amostras são submetidas ao vácuo por 5 minutos e à pressão por 1 hora. Esse ciclo é feito por mais uma vez sem a abertura da autoclave. Na estufa, as amostras são confinadas durante 22 horas em uma temperatura de 60°C a 70°C com uma umidade relativa menor do que 15%.

No método B da EN 14080:2013 destinado para aprovação do adesivo como sendo do tipo II (EN 391:2001), as amostras devem ser expostas ao vácuo por um período de 30 minutos e, em seguida, aplica-se uma pressão durante 2 horas. Na estufa, a secagem é feita em 15 horas em uma temperatura de 65°C a 75°C e uma umidade relativa de 10%.

No método C da EN 14080:2013 destinado para aprovação do adesivo como sendo do tipo I (EN 391:2001), os corpos de prova são submetidos ao vácuo por 30 minutos e à pressão por 2 horas. Esse ciclo é realizado novamente totalizando 5 horas de ensaio. Em seguida, o material é seco dentro de um período de 90 horas sobre uma temperatura de 25°C a 35°C e uma umidade relativa de 25% a 35%.

A resistência das peças estruturais com emendas dentadas é determinada de acordo com o documento normativo EN 408:2010. Segundo a norma EN 385:2001, as amostras são elementos estruturais com a maior seção transversal produzida pelas empresas de MLC. Metade das amostras é feita com as emendas posicionadas verticalmente e o restante são

produzidas com as ligações horizontalmente. O procedimento consiste na aplicação de um carregamento constante até a ruptura da peça analisada. Além disso, o capítulo 9 da EN 408:2010 apresenta o procedimento para determinação do MOE em flexão das vigas estruturais de MLC.

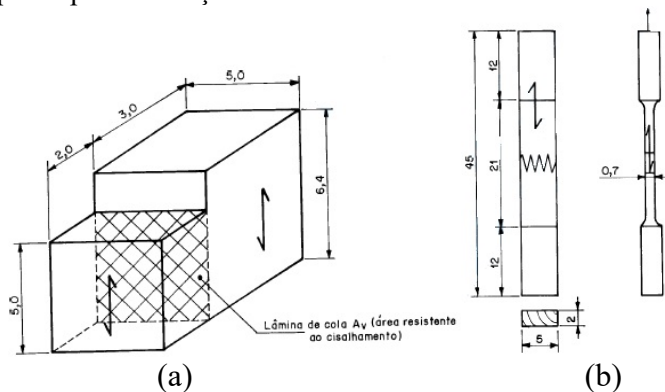
5.4 Norma brasileira sobre madeira laminada colada

No Brasil ainda não existe uma norma da ABNT para avaliação das propriedades dos elementos estruturais de MLC expostos em ambientes externos e internos. Os ensaios realizados hoje no país são baseados em normas vigentes de outras nações as quais foram citadas anteriormente. Atualmente, estão em fase de redação final, para posterior consulta nacional, os projetos de norma ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 e ABNT NBR ISO PN 02:126.10-001-3, baseados nos procedimentos descritos nas normas europeias, EN 14080:2013 e EN 408:2010, e na ISO 13910:2013, respectivamente. Os respectivos projetos de norma podem ser usados para realizar uma classificação dos elementos estruturais feitos de MLC e testar o desempenho dos adesivos estruturais por meio dos ensaios de cisalhamento nas linhas de cola, flexão estática a quatro pontos, quantidade de adesivo espalhado, delaminação e tração nas emendas dentadas. Esses ensaios, também, podem ser aplicados no controle de qualidade dos elementos estruturais de LVL. Diferentemente da norma brasileira atual, as amostras de cisalhamento são retiradas das vigas ensaiadas na flexão estática e as amostras de tração são produzidas a partir de peças estruturais considerando-se os defeitos. Além disso, nesses projetos de norma, não existe nenhum ensaio de verificação da resistência da linha de cola à tração normal às fibras da madeira.

A norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 atual descreve alguns procedimentos de ensaio em seu anexo B. Esses procedimentos são realizados em amostras isentas de defeitos e abrangem os ensaios de tração nas emendas dentadas paralelo às fibras da madeira, tração normal à linha de cola e cisalhamento na linha de cola paralelo às fibras da madeira. Os corpos de prova de cada análise estão representados na Figura 5.1 e Figura 5.2. Vale salientar que a norma é falha na avaliação de elementos estruturais feitos de MLC, pois os procedimentos necessários para avaliação das características mecânicas tanto dos elementos estruturais, como dos adesivos e das emendas denteadas não são realizados em peças estruturais. Ademais, não existe nenhum ensaio distinto para os adesivos usados em ambientes internos ou externos.

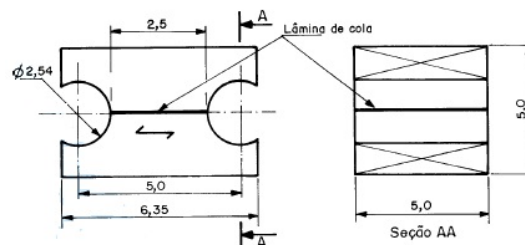
Os outros itens da ABNT NBR 7190:1997 apresentam algumas características necessárias para a fabricação das peças estruturais de MLC. Segundo a norma, esses elementos só podem ser feitos por indústrias para garantir a condição de controle no local de serviço e os adesivos usados na junção das lamelas devem ser aplicados conforme as recomendações do fabricante para assegurar a longevidade e a segurança da estrutura.

Figura 5.1 - (a) Corpo de prova para avaliação da resistência ao cisalhamento da linha de cola paralelo às fibras (b) Corpo de prova para avaliação da resistência da emenda dentada à tração paralela às fibras



Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Figura 5.2 - Corpo de prova para avaliação da resistência da linha de cola à tração normal às fibras da madeira



Fonte: ABNT NBR 7190:1997

5.5 Comparação entre os procedimentos de delaminação

Na Tabela 5.2 são apresentados de forma sucinta os principais parâmetros para a realização do ensaio de delaminação por cada norma. Além disso, a porcentagem máxima permitida também está presente para cada ensaio. No projeto de norma brasileiro ABNT NBR PN 02:126.10-001-5, o procedimento para adesivos usados em ambientes externos é semelhante ao método B da EN 14080:2013, enquanto o ensaio para adesivos destinados a ambientes internos é semelhante com o método C da EN 14080:2013. A principal mudança entre as duas normas está na porcentagem de delaminação permitida. Esse limite, para o projeto de norma brasileiro, pode ser encontrado no Anexo A.

Tabela 5.2 – Resumo dos métodos de ensaio de delaminação

Norma Canadense	Norma Canadense	Norma Americana	Norma Europeia	Norma Europeia	Norma Europeia
CSA	CSA	ASTM D 2559:2004	EN	EN	EN
112.09:2004	112.10:2007		14080:2013	14080:2013	14080:2013
Adesivo para uso externo	Adesivo para uso interno	Adesivo para uso externo	Método A	Método B	Método C
O ensaio começa com a submersão das amostras em água a 22°C. Em seguida, ocorre a aplicação de vácuo, 75 kPa, por duas horas e de pressão, 540 kPa, por duas horas, antes de ir para estufa realiza-se um novo ciclo. Na estufa a temperatura deve ser a 28±2°C e o tempo de confinamento é 88 horas. Em seguida, realiza-se mais duas vezes esse procedimento	O ensaio começa com a submersão das amostras em água a 22°C. Em seguida, ocorre a aplicação de vácuo, 75 kPa, por duas horas e de pressão, 540 kPa, por duas horas, antes de ir para estufa realiza-se um novo ciclo. Na estufa a temperatura deve ser a 28±2°C e o tempo de permanência é 88 horas. Em seguida, realiza-se mais duas vezes esse procedimento. Só pode ser realizado em coníferas	O ensaio começa com a submersão das amostras em água a 18°C a 27°C. Em seguida, ocorre a aplicação de vácuo, 85 kPa, por 5 minutos e de pressão, 517 kPa, por uma hora, antes de ir para estufa realiza-se um novo ciclo. Na estufa a temperatura deve ser a 65,5°C e o tempo de confinamento é 22 horas. Em seguida, realiza-se um ciclo com vapor a 100°C durante uma hora e meia e depois as amostras são submersas em água a 18°C a 27°C para a aplicação de pressão a 517 kPa por 40 minutos. Na estufa a temperatura deve ser a 65,5°C e o tempo de confinamento é 22 horas. Posteriormente, os dois ciclos iniciais compostos por vácuo e pressão deve ser repetido e a secagem novamente é realizada após o término	O ensaio começa com a submersão das amostras em água a 10°C a 20°C. Em seguida, ocorre a aplicação de vácuo, entre 70 kPa e 85 kPa, por 5 minutos e de pressão, entre 500 kPa a 600 kPa, por uma hora. Em seguida, realiza-se um novo ciclo. Na estufa a temperatura deve ser entre 60°C a 70°C com teor de umidade de no máximo 15% e circulação de ar entre 2 m/s a 3 m/s . O tempo de confinamento na estufa é entre 21 a 22 horas	O ensaio começa com a submersão das amostras em água a 10°C a 20°C. Em seguida, ocorre a aplicação de vácuo, entre 70 kPa e 85 kPa, por 30 minutos e de pressão, entre 500 kPa a 600 kPa, por duas horas. Na estufa a temperatura deve ser entre 60°C a 70°C com teor de umidade de entre 8% a 10% e circulação de ar entre 2 m/s a 3 m/s . O tempo de permanência na estufa é entre 10 a 15 horas	O ensaio começa com a submersão das amostras em água a 10°C a 20°C. Em seguida, ocorre a aplicação de vácuo, entre 70 kPa e 85 kPa, por 30 minutos e de pressão, entre 500 kPa a 600 kPa, por duas horas. Em seguida, realiza-se um novo ciclo. Na estufa a temperatura deve ser entre 25°C a 30°C com teor de umidade de entre 25% a 35% e circulação de ar entre 2 m/s a 3 m/s . O tempo de permanência na estufa é 90 horas
delaminação máxima para coníferas 1% e folhosas 1,6%	delaminação máxima para coníferas 1%	delaminação máxima para coníferas 1% e folhosas 1,6%	delaminação máxima 5%	delaminação máxima 4%	delaminação máxima 10%

Fonte: CSA 112.09:2004, CSA 112.10:2007, ASTM D 2559:2004 e EN 14080:2013

5.6 Conclusões sobre a revisão bibliográfica

Esse item apresenta algumas conclusões obtidas por meio da revisão bibliográfica realizada:

a) a madeira é um substrato de difícil colagem, principalmente, devido às suas propriedades químicas e físicas que são diferentes para cada espécie de madeira e também dentro de uma mesma espécie. Alguns fatores que contribuem para alteração do desempenho da colagem são: massa específica, extrativos, permeabilidade e molhabilidade;

b) o local que será destinado à peça estrutural de MLC e LVL define o tipo de adesivo que será aplicado no aderente;

c) a melhora dos elementos estruturais de MLC e LVL está ligada diretamente aos parâmetros adotados no processo de produção das empresas;

d) a classificação das lamelas e lâminas garante uma melhora das propriedades mecânicas dos elementos estruturais de MLC e LVL;

e) as emendas dentadas necessárias para elementos estruturais de MLC e LVL de grandes dimensões são regiões de fragilidade;

f) as normas estrangeiras possuem diferentes metodologias de ensaio para verificação do desempenho da MLC. Os ensaios principais para realização da caracterização do produto são fluência, delaminação, cisalhamento da linha de cola paralelo às fibras da madeira, tração das emendas dentadas paralelas às fibras da madeira e ensaio de flexão estática em quatro pontos.

g) as propostas de normas brasileiras, ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 e ABNT NBR ISO PN 02:126.10-001-3, especificam métodos de ensaios para o controle de qualidade dos elementos estruturais de MLC e LVL.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Um intenso planejamento experimental foi realizado com o propósito de propor as recomendações para o controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e de LVL. Nas seções seguintes são mostradas as características dos materiais usados e os métodos de ensaios aplicados nessa pesquisa.

6.1 Materiais

As vigas de MLC utilizadas no programa experimental foram produzidas por uma empresa do mercado nacional, seguindo-se os parâmetros gerais de sua produção comercial. O lote era composto por 102 vigas com comprimentos e seções transversais variáveis. Ademais, esses elementos estruturais foram fabricados com quatro espécies de madeira: *Pinus sp.*, eucalipto urograndis, *Tectona grandis* e *Eucalyptus grandis*, e quatro tipos de adesivos, Tabela 6.1. Logo após o recebimento, as vigas foram armazenadas em local coberto, Figura 6.1, para estabilizar o teor de umidade do material em torno de 12%.

Figura 6.1 - Armazenamento das vigas de MLC de diferentes espécies de madeira



Fonte: o autor

Tabela 6.1 - Características e dimensões nominais das vigas estruturais de MLC

Grupo	Espécie de madeira	Adesivo	Quantidade	Base (mm)	Altura (mm)	nº	h (mm)	c (cm)	f
1	<i>Tectona grandis</i>	Jowapur® 686.40	10	90	176	8	22	352	sim
2	<i>Eucalyptus grandis</i>	Jowapur® 686.40	10	60	180	5	36	360	sim
3	<i>Eucalyptus grandis</i>	Jowapur® 686.40	10	60	180	6	30	360	sim
4	<i>Eucalyptus grandis</i>	Kleiberit® PUR 510.0	4	50	180	8	22	360	sim
5	<i>Eucalyptus grandis</i>	Kleiberit® PUR 510.0	8	50	180	6	30	360	não
6	Eucalipto urograndis	MUF 1242/2542	10	60	180	6	30	360	não
7	Eucalipto urograndis	MUF 1247/2526	10	60	180	6	30	360	não
8	Eucalipto urograndis	Jowapur® 686.40	10	80	180	6	30	360	sim
9	Eucalipto urograndis	Jowapur® 686.40	10	60	270	9	30	590	sim
10	<i>Pinus sp.</i>	Jowapur® 686.40	10	85	180	5	36	360	sim
11	<i>Pinus sp.</i> (com tratamento)	Jowapur® 686.40	10	85	180	5	36	360	sim

Nota: nº: número de lamelas por viga, h: espessura das lamelas, c: comprimento da viga e f: vigas que continham emendas dentadas distribuídas aleatoriamente ao longo do da sua altura e do comprimento da lamela.

Fonte: O autor

Após os ensaios de flexão estática, destes grupos de vigas foram extraídos os corpos de prova para os ensaios de compressão, cisalhamento e delaminação. Para a análise da resistência das emendas dentadas foi utilizado outro lote constituído por 91 peças de 2,40 metros de comprimento produzidas com as mesmas espécies de madeira das vigas e quatro tipos de adesivos, Tabela 6.2.

As vigas de LVL usadas nesta pesquisa foram produzidas por outra empresa nacional, seguindo-se os parâmetros gerais de sua produção comercial. Na produção, os elementos estruturais foram fabricados a partir da colagem de painéis de LVL. Em cada um desses painéis, uma lâmina com as fibras normais ao eixo longitudinal do elemento estrutural era posicionada a cada três lâminas com as fibras distribuídas paralelamente ao comprimento do produto.

O lote era composto por 37 vigas com seção transversal variável e posicionamento das lamelas nas posições horizontal e vertical, Tabela 6.3 e Tabela 6.4. Os painéis usados para produção dos elementos estruturais foram diferentes para cada grupo. Além disso, entre as lâminas foi utilizado um adesivo fenólico e na junção das emendas dentadas a resina epóxi. O fabricante do produto não forneceu as especificações técnicas do adesivo e nem seu nome comercial. Logo após o recebimento, as vigas foram armazenadas em local coberto para estabilizar o teor de umidade do material em torno de 12%.

Tabela 6.2 - Características e dimensões nominais das peças estruturais para o ensaio das uniões dentadas

Grupo	Espécie de madeira	Adesivo	Quantidade	Base (mm)	Altura (mm)
12	<i>Tectona grandis</i>	Purbond® HB S109	10	90	22
13	<i>Eucalyptus grandis</i>	Purbond® HB S109	10	60	36
14	<i>Eucalyptus grandis</i>	Purbond® HB S109	10	60	30
15	Eucalipto urograndis	MUF 1242/2542	10	60	30
16	Eucalipto urograndis	MUF 1247/2526	11	60	30
17	Eucalipto urograndis	Jowapur® 686.40	10	80	30
18	Eucalipto urograndis	Purbond® HB S109	10	80	30
19	<i>Pinus sp.</i>	Jowapur® 686.40	10	85	40
20	<i>Pinus sp.</i>	Purbond® HB S109	10	85	40

Fonte: O autor

Tabela 6.3 - Características e dimensões nominais das vigas estruturais de LVL horizontal

Grupo	Espécie de madeira	Quantidade	Base (mm)	Altura (mm)	Comprimento (cm)	f	ep (mm)	en (mm)
21	<i>Pinus sp.</i>	4	50	100	450	sim	4	1,5
22	<i>Pinus sp.</i>	5	50	150	450	sim	4	1,5
23	<i>Pinus sp.</i>	4	50	200	450	sim	4	1,5
24	<i>Pinus sp.</i>	5	50	250	450	sim	4	1,5
25	<i>Pinus sp.</i>	5	50	300	450	sim	4	1,5

Nota: f: vigas que continham emendas dentadas de grande dimensão na seção transversal, ep: espessura da lâmina paralela ao comprimento da viga e en: espessura da lâmina normal ao comprimento da viga.

Fonte: O autor

Tabela 6.4 - Características e dimensões nominais das vigas estruturais de LVL vertical

Grupo	Espécie de madeira	Quantidade	Base (mm)	Altura (mm)	Comprimento (cm)	f	ep (mm)	en (mm)
26	<i>Pinus sp.</i>	3	48	150	200	não	4	1,5
27	<i>Pinus sp.</i>	3	49	200	200	não	4	1,5
28	<i>Pinus sp.</i>	4	46	150	300	sim	4	1,5
29	<i>Pinus sp.</i>	4	45	200	300	sim	4	1,5

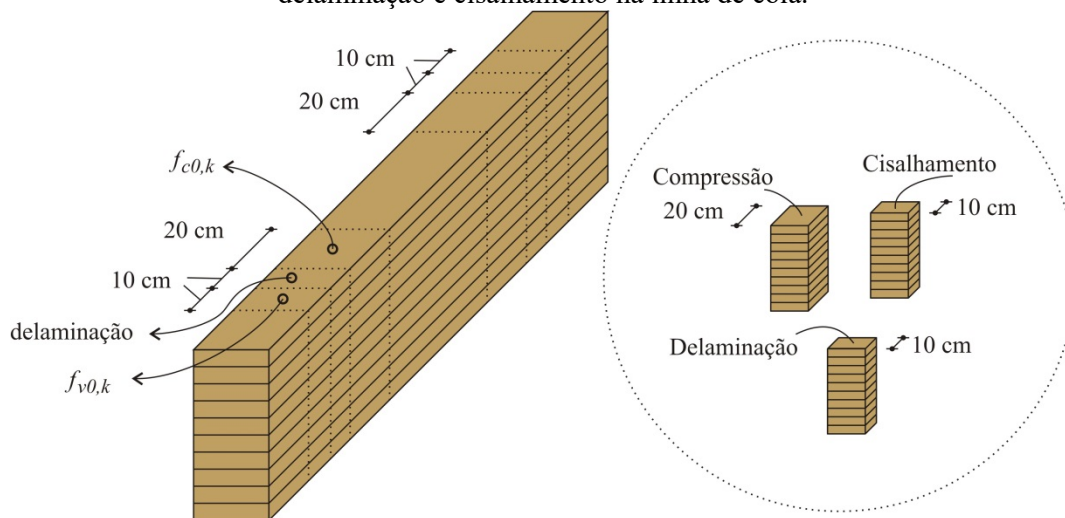
Nota: f: vigas que continham emendas dentadas de grande dimensão na seção transversal, ep: espessura da lâmina paralela ao comprimento da viga e en: espessura da lâmina normal ao comprimento da viga.

Fonte: O autor

Após os ensaios de flexão estática, destes grupos foram extraídos das vigas os corpos de prova para os ensaios de compressão, cisalhamento e delaminação.

No processo de extração dos corpos de prova, um trecho de aproximadamente 20 cm das extremidades foi descartado por apresentar irregularidades ocasionadas pelo aplainamento das lamelas e do elemento estrutural. As amostras para o ensaio de delaminação e de cisalhamento foram extraídas com uma dimensão de 10 cm do comprimento da viga, enquanto os corpos de provas para o ensaio de compressão foram retirados com um comprimento de 20 cm. Os cortes foram feitos na direção normal às fibras da madeira com o auxílio de uma máquina apropriada para não provocar nenhum dano nas superfícies dos materiais. Nos três corpos de prova, a altura e a base das estruturas não foram alteradas na retirada do material, a remoção de cada amostra é mostrada na Figura 6.2.

Figura 6.2 - Comprimento e regiões para o corte dos corpos de prova para a análise de compressão, delaminação e cisalhamento na linha de cola.



Fonte: o autor

6.2 Adesivos estruturais

Na indústria, cinco tipos de adesivos comerciais foram utilizados para a produção dos elementos estruturais de MLC, sendo três poliuretanos (Kleiberit® PUR 510.0, Purbond® HB S109 e Jowapur® 686.40) e dois a base de melamina-uréia-formaldeído (1242/2542 e 1247/2526). Conforme o manual técnico da Kleiberit, O Kleiberit® PUR 510.0 é um adesivo monocomponente à base poliuretano, possui uma satisfatória resistência na presença de água e em elevadas temperaturas sendo recomendado para a produção de vigas de madeira colada destinadas a ambientes externos protegidos e internos. O tempo de aplicação do produto no aderente, após sua abertura, é por volta de 60 minutos em temperatura ambiente e o tempo de cura gira em torno de 180 minutos. O Purbond® HB S109, também é uma resina monocomponente feita de poliuretano e pode ser usado na junção das emendas dentadas e na produção de madeira laminada colada. Além disso, a madeira colada com esse produto deve ser destinada somente a ambientes internos e externos protegidos. Na colagem do material, o adesivo tem um bom desempenho de aplicação nos primeiros 10 minutos após sua exposição com o ar. A sua cura sob pressão é feita em temperatura ambiente durante 25 minutos (PURBOND, 2007).

Outro adesivo monocomponente de poliuretano usado na pesquisa foi o Jowapur® 686.40. De acordo com manual técnico da empresa Jowat Swiss AG, essa resina é destinada, principalmente, a fabricação de peças estruturais de madeira laminada colada e de emendas dentadas. Em condições ambientes de temperatura e umidade, a aplicação do adesivo no substrato, após sua abertura, pode ser conduzida dentro de no máximo 35 minutos. O tempo de cura, para obter uma satisfatória colagem, fica por volta de 70 minutos.

Os adesivos bicomponente à base de melamina-uréia-formaldeído usados foram de dois tipos: 1242/2542 e 1247/2526. O primeiro número faz referência ao tipo do adesivo e o segundo pertence ao tipo de catalisador usado. Esses são sugeridos na produção de elementos estruturais de madeira colada e emendas dentadas que ficarão expostos em ambientes externos. A proporção da mistura entre o endurecedor e o adesivo necessária para a aplicação no aderente difere para cada tipo. Além disso, existe uma diferença entre as densidades, as viscosidades e o PH de cada adesivo e de cada endurecedor (AKZO NOBEL, 2001; AKZO NOBEL, 2009).

O fabricante dos elementos estruturais de LVL só informou que na adesão das lâminas foi usado o adesivo fenólico e na produção das emendas dentadas das vigas foi usado ao adesivo epóxi.

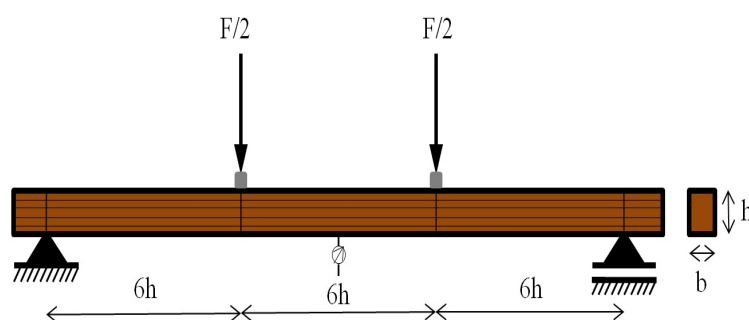
6.3 Métodos

Os ensaios de desempenho das vigas foram realizados no LaMEM, pertencente ao Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), localizado na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Os ensaios de características mecânicas das vigas de MLC e LVL foram feitos seguindo a proposta dos projetos de norma ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5, Anexo A, e ABNT NBR ISO PN 02:126.10-001-3 baseados nas normas europeia, EN 14080:2013 e EN 408:2010, e na ISO 13910:2013, respectivamente, como também, na ABNT NBR 7190:1997. A metodologia proposta para a realização dos ensaios compreende de ensaio de flexão estática em quatro pontos para determinar o MOE e o MOR nas vigas e na retirada de corpos de prova destas para determinação da delaminação, do cisalhamento paralelo às fibras da linha de cola e da compressão paralela às fibras. Além disso, prevê a realização de ensaios de tração paralela às fibras de peças estruturais com emendas dentadas.

6.3.1 Ensaio de flexão estática a quatro pontos

As vigas de MLC e de LVL usadas na pesquisa foram analisadas com base no procedimento descrito na norma ABNT NBR ISO PN 02:126.10-001-3. O ensaio de flexão estática a quatro pontos teve como finalidade a determinação do MOE e do MOR dos elementos estruturais de madeira, com base no esquema estático e de carregamento apresentado na Figura 6.3. Nessa configuração de ensaio, o esforço cortante é nulo no terço central das vigas e o momento fletor é constante nessa região. Para evitar a instabilidade lateral das vigas foram fixados contraventamentos de madeira na laje de reação e os apoios utilizados continham rolamento que permitiam a rotação do elemento estrutural, Figura 6.4. As emendas dentadas das vigas, quando possível, foram colocadas na região de maior solicitação à tração.

Figura 6.3 - Divisão do vão livre da viga para a aplicação simétrica das cargas



Fonte: o autor

Figura 6.4 - (a) Configuração do ensaio de flexão em uma viga de *Tectona grandis* e (b) Configuração do ensaio de flexão em uma viga de *Eucalyptus grandis*, grupo 2



Fonte: o autor

As medidas das dimensões dos elementos estruturais foram feitas com uma trena e um paquímetro. Na determinação do MOE, um cilindro hidráulico acoplado a um anel dinamômetro aplicou uma força constante de 10 MPa/min nas vigas. As leituras das flechas foram feitas, em forças preestabelecidas, usando um relógio comparador dentro do intervalo de deslocamento de $L/300$. Dentro desse intervalo, a viga está em regime elástico-linear. Com os valores obtidos, os MOE das vigas foram determinados pela Equação 6.1.

$$MOE = \frac{23}{108} \cdot \left(\frac{L}{b}\right)^3 \cdot \left(\frac{\Delta F}{\Delta e}\right) \cdot \frac{1}{d} \quad (6.1)$$

Sendo, MOE : módulo de elasticidade, em MPa, ΔF : variação da força entre a primeira e a última medida da flecha, em N, L : comprimento do vão livre da viga, em m, d : base da seção transversal, em m, b : altura da seção transversal, em m, e Δe : diferença entre a flecha final e a inicial, em m.

Após as leituras das flechas, uma força gradativa foi aplicada até o rompimento das vigas, Figura 6.5, e os MORs foram calculados pela Equação 6.2. Além disso, os modos de ruptura desses elementos estruturais foram também registrados.

$$MOR = \frac{F_{ult} L}{d \cdot b^2} \quad (6.2)$$

No qual, MOR : módulo de ruptura, em MPa, F_{ult} : força de ruptura, em N, L : comprimento do vão livre da viga, em m, d : base da seção transversal, em m, e b : altura da seção transversal, em m.

Figura 6.5 - (a) Uma viga do grupo 8 antes do início do ensaio e (b) Rompimento da viga do grupo no ensaio de flexão estática em quatro pontos



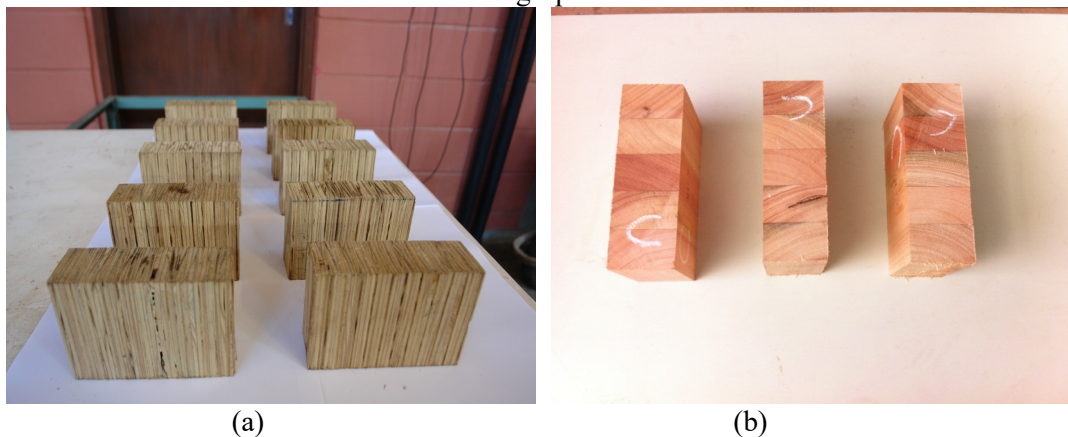
Fonte: o autor

6.3.2 Ensaio de cisalhamento

Este ensaio foi baseado na metodologia descrita pelo o projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5, Anexo A. O método consiste na aplicação de uma força de cisalhamento na linha de cola do corpo de prova com as fibras das lamelas posicionadas paralelamente ao carregamento. O propósito desse ensaio foi determinar a máxima tensão de cisalhamento em cada área de adesão e a região aonde ocorreu à falha do conjunto. Nas amostras de MLC, o carregamento foi aplicado na direção paralela às fibras, enquanto, nas amostras de LVL, posição horizontal, a sollicitação foi feita nas lâminas com fibras na direção normal ao eixo longitudinal da viga. Por outro lado, para determinar o cisalhamento do LVL, na posição vertical, todas as lâminas foram sollicitadas ao mesmo tempo.

As dimensões da seção transversal dos corpos de provas foram medidas com auxílio de um paquímetro e algumas amostras estão ilustradas na Figura 6.6.

Figura 6.6 - (a) Corpos de prova de cisalhamento de grupo 22 e (b) Corpos de prova de cisalhamento do grupo 2



Fonte: o autor

O procedimento foi realizado, no geral, em todas as linhas de cola das amostras de MLC e de LVL. Porém, nas amostras de LVL que continham mais de nove linhas de colas com lâminas com fibras normais ao carregamento foram avaliadas somente três em cada extremidade a uma distância de 4 cm dessa região e três na região central da seção transversal, Figura 6.7. Para as amostras solicitando todas as lâminas do LVL, posição vertical, o carregamento foi aplicado a uma distância da extremidade de um quarto da altura da amostra.

Figura 6.7 – (a) Linhas de cola ensaiadas para uma amostra do grupo 9 e (b) Linhas de cola ensaiadas para uma amostra do grupo 25



Fonte: o autor

Para a realização deste ensaio foram desenvolvidos dois protótipos de dispositivo para determinar a resistência ao cisalhamento de cada linha de cola, Figura 6.8 e Figura 6.9, maiores detalhes sobre o ensaio com estes equipamentos podem ser visto no Anexo A. Após alguns testes iniciais, observou-se que o protótipo, Figura 6.8, apresentou alguns problemas durante a aplicação do carregamento. O principal problema encontrado foi o rompimento das linhas de cola adjacentes as que estavam sendo ensaiadas devido ao giro das amostras. Além disso, nos ensaios nos quais só existiam duas lamelas as amostras tombavam do dispositivo antes da ruptura da linha de cola. Com a utilização do dispositivo da Figura 6.9, esses problemas verificados para o dispositivo da Figura 6.8 aconteceram em raríssimos casos e, por causa disso, os ensaios realizados foram feitos usando o dispositivo da Figura 6.9.

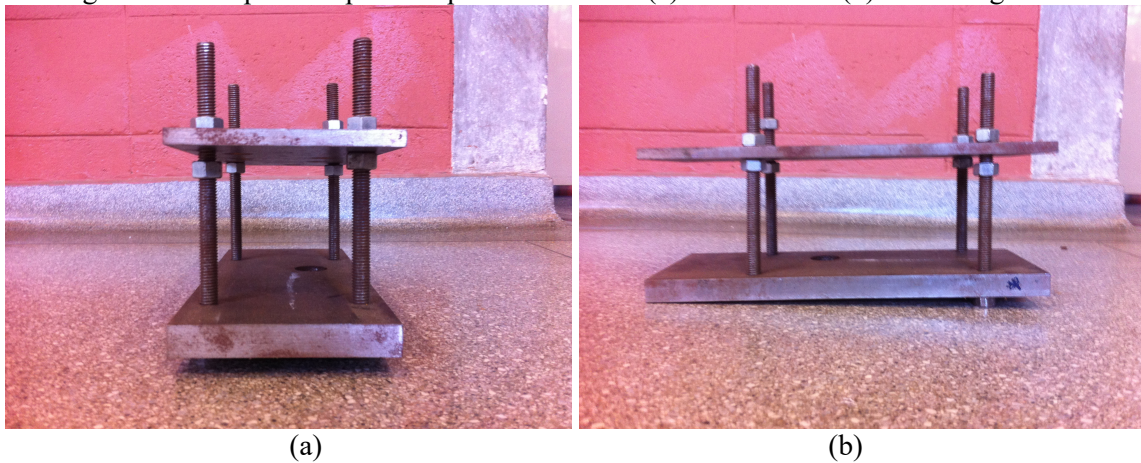
O carregamento foi aplicado por uma máquina universal durante um tempo superior a 20 segundos até que ocorresse a falha do material. A leitura de cada ruptura foi feita através de um software de computador, desenvolvido no LaMEM, que captava as forças aplicadas na célula de carga durante todo o procedimento a uma taxa aproximada de 10 MPa/min. Além disso, a porcentagem de falha ocorrida na madeira na seção transversal após o ensaio foi

analisada visualmente. A resistência ao cisalhamento na linha de cola foi determinada pela Equação 6.3.

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,máx}}{b \cdot t} \quad (6.3)$$

Sendo, f_{v0} : resistência de cisalhamento na linha de cola paralela às fibras da madeira, em MPa, $F_{v0,máx}$: força máxima de cisalhamento na linha de cola paralela às fibras da madeira, em N, b : largura da amostra, em mm, e t : altura da amostra, em mm.

Figura 6.8 - Dispositivo para máquina AMSLER: (a) Vista frontal (b) Vista longitudinal



Fonte: o autor

Figura 6.9 - Dispositivo para máquina universal: (a) Vista frontal (b) Vista longitudinal



Fonte: o autor

6.3.3 Ensaio de delaminação

O método consiste no confinamento das amostras em uma autoclave, Figura 6.10, para aplicar um ciclo de vácuo-pressão sobre imersão em água. O propósito dessa análise foi determinar o comprimento de abertura das lamelas dos corpos de prova na seção transversal, para avaliar a qualidade da colagem.

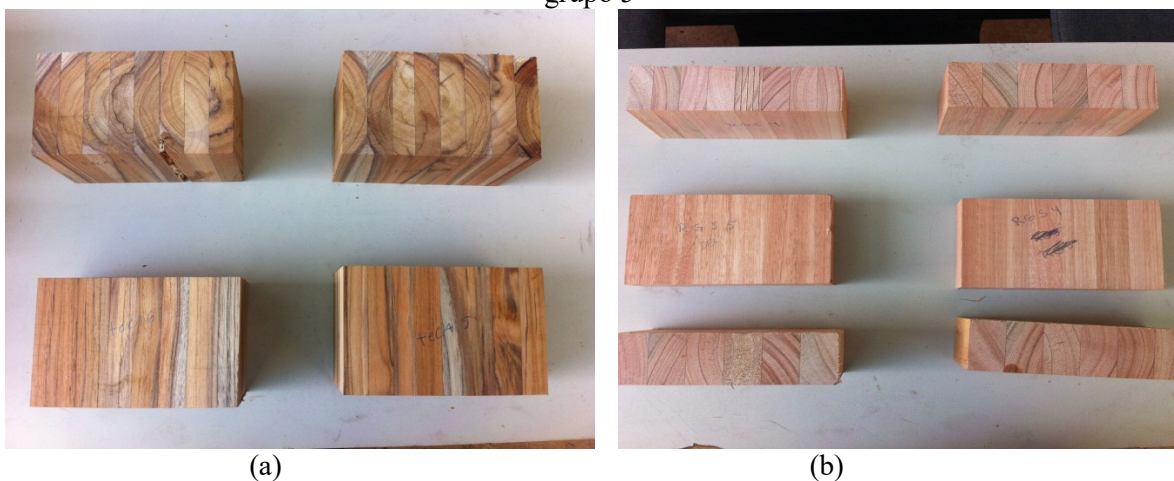
Figura 6.10 - Autoclave do ensaio de delaminação: (a) Vista frontal (b) Vista lateral



Fonte: o autor

Os corpos de prova, Figura 6.11, foram retirados em quantidades representativas das peças estruturais conforme a seção 6.1. Os comprimentos das linhas de cola foram medidos com auxílio de um paquímetro antes da realização do ensaio. Para efeito de avaliar os métodos de ensaios, o procedimento de delaminação foi realizado utilizando a norma CSA 112.9:2004 e a ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

Figura 6.11 - (a) Corpos de prova de delaminação do grupo 1 e (b) Corpos de prova de delaminação do grupo 5



Fonte: o autor

6.3.3.1 Procedimento descrito na CSA 112.9:2004

Esse documento normativo foi empregado para avaliar o desempenho das linhas de cola na situação de classe externa. Primeiramente, as amostras foram pesadas e, em seguida, foram submersas em água a uma temperatura 20°C para realizar dois ciclos de vácuo-pressão. Foi aplicado um vácuo de 75 kPa por um período de 2 horas sobre as amostras. Em seguida, uma pressão de 540 kPa foi aplicada no interior do equipamento por 2 horas para completar o primeiro ciclo. Depois de realizado o segundo ciclo, as amostras foram expostas durante 88 horas a uma temperatura em torno de 28 °C. Posteriormente, foi repetido todo esse procedimento mais duas vezes. A porcentagem da delaminação total de cada corpo de prova foi obtido pela Equação 6.4. A delaminação máxima permitida na amostra após a realização do ensaio é de apenas 1% para as coníferas e 1,6% para as folhosas.

$$D_t = \frac{L_a}{L_t} \cdot 100 \quad (6.4)$$

Em que, D_t : delaminação total, em %, L_a : somatório do comprimento da abertura de todas as linhas de cola das faces da seção transversal, em mm, e L_t : comprimento total de todas as linhas de colas das faces da seção transversal.

6.3.3.2 Procedimento descrito na ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5 baseado na EN 14080:2013

Esse procedimento é baseado no método B do ensaio de delaminação da EN 14080:2013. No ensaio de delaminação foi utilizado o procedimento para adesivos usados em ambientes externos. As amostras foram submergidas em água a uma temperatura de 20°C e, primeiramente, foi aplicado um vácuo de 75 kPa durante 30 minutos. Posteriormente, os corpos de prova ficaram submetidos por duas horas a uma pressão de 550 kPa. Após o ciclo de vácuo-pressão, as amostras ficaram em estufas por 12 horas a uma temperatura de 75 °C. Além disso, dentro da estufa o fluxo de ar estava entre 2 a 3 m/s e a umidade relativa em torno de 8% a 10%. A porcentagem da delaminação total de cada corpo de prova foi obtido pela Equação 6.4. A delaminação máxima permitida na amostra após a realização do ensaio é de apenas 4% para as coníferas e 6% para as folhosas.

6.3.4 Ensaio de tração nas emendas dentadas

Este ensaio seguiu os procedimentos descritos no projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5 para a realização do ensaio de tração paralela às fibras nas emendas dentadas de peças estruturais de madeira, Anexo A. A finalidade dessa análise foi determinar à resistência característica à tração paralela às fibras das uniões em um conjunto de amostras produzidas com o mesmo tipo de adesivo e a mesma espécie de madeira. Como exposto na seção 6.1, todas as peças estruturais foram obtidas de uma única empresa. Uma parte dos corpos de prova usado na determinação da tensão está representada pela Figura 6.12.

Figura 6.12 – (a) Vista geral das peças estruturais com emendas dentadas e (b) Emenda dentada em uma peça estrutural do grupo 1



Fonte: o autor

O controle de qualidade na produção das emendas não foi acompanhado na fábrica fornecedora do material e, por esse motivo ao receber o produto verificou-se que algumas peças tinham problemas de prensagem e continham defeitos, Figura 6.13. Desta maneira, os resultados podem ser influenciados devido à abertura de fissuras e a presença de nós nas regiões das emendas dentadas.

Figura 6.13 - Aberturas de fissuras e presença de nós nas regiões das emendas dentadas em uma peça estrutural de teca



Fonte: o autor

As emendas dentadas foram colocadas na região central da máquina Metriguard do LaMEM, modelo 422, Figura 6.14. O carregamento foi aplicado a uma taxa de tensão de aproximadamente 10 MPa/min até a ruptura de cada peça estrutural. A resistência à tração paralela às fibras das emendas foi calculada a partir da Equação 6.5.

Figura 6.14 - Máquina Metriguard usada no ensaio de tração nas emendas dentadas



Fonte: o autor

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,máx}}{A_{gt,0}} \quad (6.5)$$

Em que, f_{t0} : resistência à tração paralela às fibras da emenda dentada, em MPa, $F_{t0,máx}$: força máxima de tração paralela às fibras no momento da ruptura da emenda dentada, em N, e $A_{gt,0}$: área da seção transversal da emenda dentada inicial, em m².

Além da resistência à tração paralela às fibras, determinou-se o modo de ruptura na peça estrutural com a utilização da Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Tipos de modos de ruptura das emendas dentadas

Modo de Ruptura	Descrição da Ruptura	Exemplo
1	<p>Maior parte da ruptura ocorre ao longo da linha de colagem do perfil da união com pouca ruptura na madeira (ruptura na madeira <70%)</p>	
2	<p>Maior parte da ruptura ocorre ao longo da linha de colagem do perfil da união com boa ruptura de cisalhamento na madeira (ruptura na madeira >70%)</p>	
3	<p>Maior parte da ruptura ocorre ao longo do perfil da união mas com alguma ruptura na madeira nas raízes dos dentes. Boa ruptura na madeira ao longo das superfícies do perfil da união</p>	
4	<p>Maior parte da ruptura a tração nas raízes dos dentes com alta ruptura na madeira. Pouca ruptura de qualquer tipo ao longo do perfil da união</p>	
5	<p>A ruptura começa na união e se afasta progressivamente para fora da união. Essencialmente 100% ruptura na madeira</p>	
6	<p>A ruptura é fora da união (não influenciada pela união) e 100% de ruptura na madeira</p>	

Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

6.3.5 Ensaio de compressão paralela às fibras

Este ensaio foi baseado na metodologia descrita pela norma ABNT NBR 7190:1997 com adaptação para peças estruturais. O objetivo dessa análise foi determinar a resistência à compressão paralela às fibras da madeira para verificar qual a classe de resistência das vigas ensaiadas. Cada amostra tinha altura de 20 cm e área de aplicação da força igual à área da seção transversal do elemento estrutural, seção 6.1.

As dimensões da seção transversal das amostras foram medidas com auxílio de um paquímetro e algumas amostras estão mostradas na Figura 6.15.

Figura 6.15 - Corpos de prova de compressão do grupo 9



Fonte: o autor

Os corpos de prova foram colocados na máquina de ensaio ELE – AUTOTEST 2000, com capacidade de carga de 2000 kN, Figura 6.16. Uma força de compressão a uma taxa de 10 MPa/min foi aplicada na amostra até sua ruptura. A resistência a compressão paralela às fibras (f_{c0}), em MPa, foram obtidas a partir da Equação 6.6.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad (6.6)$$

Sendo, $F_{c0,máx}$: força máxima de compressão aplicado na amostra, em N, e A : área da seção transversal da amostra, em m^2 .

Figura 6.16 - Configuração do ensaio de compressão paralelo às fibras



Fonte: o autor

6.3.6 Resistência característica das propriedades mecânicas

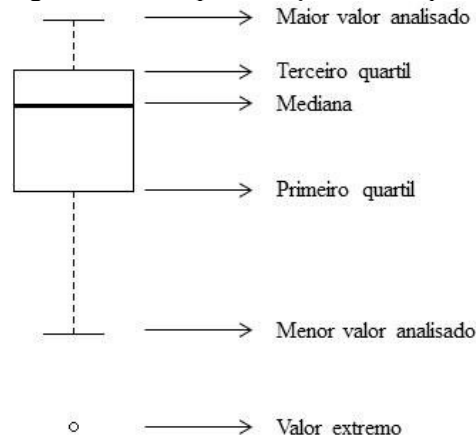
Para os ensaios realizados foram estimadas às resistências características conforme a ABNT NBR 7190:1997 com a utilização da Equação 6.7.

$$f_k = \left(2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\frac{n}{2}}}{\frac{n}{2} - 1} - f_{\frac{n}{2}} \right) \times 1,1 \quad (6.7)$$

Sendo, f_k : o valor característico, n : número total de ensaios. Para o cálculo, os valores das resistências são dispostos do menor para o maior, $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_n$, caso a quantidade de valores seja ímpar, o maior valor deve ser desconsiderado. Além disso, a norma especifica que a resistência característica é o maior valor entre o f_k , f_1 e 0,7 do valor médio de todos os resultados.

6.3.7 Análise estatística dos resultados

Para os ensaios de cisalhamentos com grandes quantidades de dados foi utilizado o *box-plot*, Figura 6.17, na intenção de realizar uma análise de sua distribuição.

Figura 6.17 - Representação do *box-plot*

Fonte: o autor

De acordo com Magalhães e Lima (2015), 50% dos dados da amostragem central estão situados entre o primeiro quartil e o terceiro. O primeiro quartil compreende o valor em que 75% dos dados são superiores a ele, enquanto que, somente 25% da amostragem excedem o valor do terceiro quartil. O valor extremo simboliza as informações que não estão dentro das regiões delimitadas pelo menor e maior valor analisado. Além disso, o menor valor analisado é obtido pela Equação 6.8, enquanto o maior valor analisado é dado pela Equação 6.9.

$$V_1 \geq Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1) \quad (6.8)$$

$$V_2 \leq Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_1) \quad (6.9)$$

Em que, V_1 : o menor dado da amostragem que atende a inequação, V_2 : o maior dado da amostragem que atende a inequação, Q_1 : primeiro quartil e Q_3 : terceiro quartil.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados conforme o capítulo anterior. Além disso, algumas análises dos resultados foram realizadas para compreender algumas características dos elementos estruturais recebidos.

7.1 Ensaio de flexão estática a quatro pontos para as vigas de MLC

No ensaio de flexão estática a quatro pontos foram determinados o MOE e o MOR das vigas. O valor do MOE obtido de cada viga de MLC foi resumido por meio de seus grupos, Tabela 7.1. Nessa tabela são apresentados o valor da média, o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada conjunto referente à rigidez.

Tabela 7.1 - Valores estatísticos do MOE de cada grupo de vigas de MLC

Grupo	Espécie de madeira	Quantidade	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
1	<i>Tectona grandis</i>	10	11753	1386	11,79
2	<i>Eucalyptus grandis</i>	10	17012	1449	8,52
3	<i>Eucalyptus grandis</i>	10	14259	895	6,28
4	<i>Eucalyptus grandis</i>	4	14772	552	3,74
5	<i>Eucalyptus grandis</i>	8	15210	1474	9,69
6	Eucalipto urograndis	10	20072	1833	9,13
7	Eucalipto urograndis	10	17812	1549	8,70
8	Eucalipto urograndis	10	19612	2363	12,05
9	Eucalipto urograndis	10	18168	636	3,50
10	<i>Pinus sp.</i>	10	8179	645	7,88
11	<i>Pinus sp.</i> (com tratamento)	10	6597	1104	16,73

Fonte: o autor

Os grupos 6 a 9, produzidos com eucalipto urograndis, alcançaram as maiores médias do MOE entre todos os grupos estudados. Os grupos 6 e 7 foram produzidos sem emendas

dentadas e os valores de suas rigidezes média foram as maiores e as menores para essa espécie de madeira, respectivamente. Notou-se que, entre as vigas de folhosas, as fabricadas com *Tectona grandis*, grupo 1, resultou na menor média do MOE, 11753 ± 1386 MPa.

A média da rigidez das vigas produzidas com a madeira de *Eucalyptus grandis* do grupo 2 mostrou o melhor desempenho para essa espécie, 17012 ± 1449 MPa, enquanto os conjuntos de 3 a 5 tiveram uma média de rigidez muito semelhante mostrando a homogeneidade das lamelas utilizadas na produção desses elementos estruturais.

Os grupos 10 e 11, compostos por vigas de *Pinus sp.*, apresentaram média diferente do MOE. As vigas sem tratamento superaram em 23,98 % a média das vigas com tratamento. Dessa maneira, as lamelas usadas em cada conjunto, provavelmente, apresentam valores distintos de rigidez.

O valor do MOR de cada viga de MLC foi resumido por meio de seus grupos, Tabela 7.2. Nessa tabela são destacados o valor da média, o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada conjunto referente à resistência. Além disso, a mesma retrata a quantidade de ensaio realizado e o MOR característico para cada combinação de espécie de madeira e adesivo.

Tabela 7.2- Valores estatísticos do MOR de cada grupo de vigas de MLC

Grupo	Espécie de madeira	Quantidade	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)	MOR _k (MPa)
1	<i>Tectona grandis</i>	10	52,0	11,1	21,28	43,1
2	<i>Eucalyptus grandis</i>	10	63,5	10,7	16,83	54,3
3	<i>Eucalyptus grandis</i>	10	44,6	7,2	16,24	36,7
4	<i>Eucalyptus grandis</i>	4	63,8	3,6	5,62	---
5	<i>Eucalyptus grandis</i>	8	64,7	8,1	12,47	54,9
6	Eucalipto urograndis	10	93,9	18,6	19,79	65,7
7	Eucalipto urograndis	10	86,8	11,8	13,63	74,6
8	Eucalipto urograndis	10	61,1	7,6	12,36	58,6
9	Eucalipto urograndis	10	56,5	7,6	13,50	49,7
10	<i>Pinus sp.</i>	10	30,6	8,5	27,68	22,5
11	<i>Pinus sp.</i> (com tratamento)	10	24,1	4,3	17,84	19,2

Nota: MOR_k: módulo de ruptura característico

Fonte: o autor

Os grupos de 6 a 9, compostos pela mesma espécie de madeira, apresentaram resultados diferentes entre suas resistências, assim como em sua rigidez. A maior média do MOR observada, 93,9 MPa, aconteceu para o grupo 6, eucalipto urograndis combinado com a MUF 1242/2542, enquanto o menor MOR médio, 56,5 MPa, foi determinado para o grupo 9 combinado com adesivo à base de poliuretano. Além disso, foi notado que, nos grupos 8 e 9, as rupturas das vigas aconteceram especialmente devido à tração nas emendas dentadas, Figura 7.1 e

Figura 7.2 e, por causa disso, a presença dessas ligações representou um decréscimo no valor da média do MOR das vigas quando comparadas com os conjuntos 6 e 7. Essa redução da resistência provocada pela falha das emendas dentadas também foi relatado no estudo desenvolvido por Tran et al. (2016) para um conjunto de vigas de MLC de carvalho e na pesquisa de Nadir e Nagarajan (2014) a média das vigas de *Hevea Brasiliensis* foi reduzida, porém estatisticamente não foi significativa.

Figura 7.1 - Flexão estática: ruptura a tração iniciada na emenda dentada da viga 2 do grupo 9



Fonte: o autor

Figura 7.2 - Flexão estática: ruptura a tração iniciada na emenda dentada da viga 3 do grupo 9



Fonte: o autor

Observou-se, também, que os grupos 8 e 9 possuíam a mesma combinação entre madeira e adesivo. Porém, existiu uma diferença entre altura da viga e a largura da mesma. Esta diferença não prejudicou a média do MOR desses conjuntos que ficaram muito próximas. Resultado contrário foi verificado por Tran et al. (2016) para as vigas de carvalho cuja melhoria da resistência da viga foi proporcionada pelo o aumento da altura da viga constituída de lamelas de mesma espessura e com larguras diferentes. Todavia, os mesmos autores constataram não haver influência nítida da altura no MOR para vigas produzidas com *Fagus sp.*

A média do MOR dos grupos 2, 4 e 5 foram bastante semelhantes, entre 63 MPa a 65 MPa. Por outro lado, o grupo 3 apresentou a menor média de MOR, 44,6 MPa, entre as vigas de *Eucalyptus grandis*. Dessa maneira, percebeu-se que as emendas dentadas presentes no elemento estrutural reduziram o valor dessa propriedade mecânica aliado com a distribuição das lamelas nas regiões externas, uma vez que, o conjunto 5, sem emendas, possuía a mesma média de rigidez do conjunto 3 e tinha menor média de rigidez do que o grupo 2. Como o grupo 4 teve um número baixo de amostras não foi possível definir a influência dessas ligações nas rupturas dessas peças. Na Figura 7.3, observa-se, em destaque, que a distribuição das emendas dentadas em camadas adjacentes da viga 4, do grupo 4, não atendeu o requisito mínimo disposto no projeto de revisão da norma brasileira ABNT NBR 7190:2013. De acordo com esse projeto de documento normativo, as lamelas adjacentes na quarta parte afastada do eixo baricêntrico horizontal a distância mínima necessária seria de 20 cm. Esse problema também foi notado em outras vigas desse grupo, portanto, o processo de produção do produto não foi criterioso.

Figura 7.3 - Flexão estática: disposição das emendas dentadas da viga 4 do grupo 4



Fonte: o autor

Entre os *Pinus sp.* dos grupos 10 e 11, as vigas sem tratamento superaram em 17,19 % o valor do MOR característico das vigas tratadas. Porém, não tem como afirmar se o tratamento químico afetou consideravelmente a resistência das vigas, pois não foi realizada uma classificação das lamelas antes da produção dos elementos estruturais e, também, pelo fato da média da rigidez do grupo 11 ser mais baixa do que a do grupo 10. Além disso, o grupo 1 alcançou um MOR característico de 43,1 MPa.

Para as vigas de MLC, a análise do seu modo de ruptura foi realizada dentro de sete grupos distintos explicados a seguir. Essa classificação foi feita visualmente logo após ocorrer à falha do elemento estrutural.

Modo 1: tração na emenda dentada seguida por cisalhamento nas lamelas adjacentes, Figura 7.4.

Modo 2: tração na emenda dentada seguida por cisalhamento nas lamelas adjacentes e compressão provocada na parte superior da viga, Figura 7.5.

Modo 3: cisalhamento na madeira, Figura 7.6.

Modo 4: cisalhamento no adesivo, Figura 7.7.

Modo 5: tração na lamela da extremidade inferior seguida por cisalhamento nas lamelas adjacentes, Figura 7.8.

Modo 6: tração na lamela da extremidade inferior seguida por cisalhamento nas lamelas adjacentes e compressão provocada na parte superior da viga, Figura 7.9.

Modo 7: compressão nas lamelas na extremidade superior, Figura 7.10.

Figura 7.4 - Modo 1: tração na emenda dentada seguida por cisalhamento nas lamelas adjacentes



Fonte: o autor

Figura 7.5 - Modo 2: tração na emenda dentada seguida por cisalhamento nas lamelas adjacentes e compressão provocada na parte superior da viga



Fonte: o autor

Figura 7.6 - Modo 3: cisalhamento na madeira



Fonte: o autor

Figura 7.7 - Modo 4: cisalhamento no adesivo



Fonte: o autor

Figura 7.8 - Modo 5: tração na lamela da extremidade inferior seguida por cisalhamento nas lamelas adjacentes



Fonte: o autor

Figura 7.9 - Modo 6: tração na lamela da extremidade inferior seguida por cisalhamento nas lamelas adjacentes e compressão provocada na parte superior da viga



Fonte: o autor

Figura 7.10 - Modo 7: compressão nas lamelas na extremidade superior



Fonte: o autor

As frequências, em porcentagem, do modo de ruptura de cada grupo de vigas de MLC estão dispostas na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Frequência em porcentagem do modo de ruptura das vigas de MLC estudadas

Grupo	Modo de Ruptura						
	1	2	3	4	5	6	7
1	80	20	0	0	0	0	0
2	60	0	0	0	20	10	10
3	80	0	0	0	20	0	0
4	50	50	0	0	0	0	0
5	0	0	0	12,5	62,5	12,5	12,5
6	0	0	20	10	10	60	0
7	0	0	10	0	60	30	0
8	100	0	0	0	0	0	0
9	70	0	20	10	0	0	0
10	100	0	0	0	0	0	0
11	100	0	0	0	0	0	0

Fonte: o autor

Nas vigas com emendas dentadas, houve uma predominância na ruptura à tração dessas ligações quando sua localidade estava nas zonas de maiores tensões de tração. Observou-se que poucas vigas sofreram somente falha por compressão ou por cisalhamento do adesivo ou da madeira. Nos casos dos elementos estruturais sem emendas, predominou a tração nas extremidades inferiores sem compressão ou com compressão.

7.2 Ensaio de flexão estática a quatro pontos para as vigas de LVL na posição horizontal

No ensaio de flexão estática a quatro pontos foram determinados o MOE e MOR das vigas. O valor do MOR de todas as vigas de LVL, na posição horizontal, foi resumido por meio de seus grupos, Tabela 7.4. Nessa tabela são destacados o valor médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada grupo referente à resistência. Além disso, a mesma retrata a quantidade de ensaio realizado e o MOR característico.

Tabela 7.4- Valores estatísticos do MOR de cada grupo de vigas de LVL na posição horizontal

Grupo	Quantidade	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)	MOR _k (MPa)
21	4	21,9	4,5	20,43	17,2
22	5	25,1	3,4	13,63	21,9
23	4	26,9	3,5	12,94	23,4
24	5	24,2	4,8	19,77	17,0
25	5	21,4	0,8	3,56	20,4
Média		23,9			

Nota: MOR_k: módulo de ruptura característico

Fonte: o autor

As quantidades de vigas ensaiadas não foram representativas devido ao baixo número de amostras ensaiadas. Todavia, o valor da média do MOR de cada grupo ficou na faixa entre 21 a 27 MPa. Como a diferença entre os conjuntos foi com relação às alturas das vigas, a que obteve o melhor resultado foi o grupo 23 com 20 cm de altura, com média de MOR de 26,9 MPa. Por outro lado, no grupo 25 foi verificado a pior média de MOR, 21,4 MPa, sendo a altura dessas vigas igual a 30 cm. A média de todos os grupos para essa propriedade mecânica foi de 23,9 MPa.

O valor do MOE determinado para todas as vigas de LVL, na posição horizontal, foi resumido por meio de seus grupos, Tabela 7.5. Nessa tabela são apresentados o valor médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada conjunto referente à rigidez.

Tabela 7.5 - Valores estatísticos do MOE das vigas de LVL na posição horizontal

Grupo	Quantidade	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
21	4	9986	449	4,49
22	5	9132	323	3,53
23	4	10025	768	7,66
24	5	9768	748	7,66
25	5	9997	934	9,34
Média		9782		

Fonte: o autor

O número de elementos estruturais ensaiados para cada grupo foi muito pequeno para tirar conclusões definitivas. Entretanto, o valor da média do MOE de cada grupo ficou na faixa entre 9132 a 10025 MPa. Como a diferença entre os conjuntos foi com relação às alturas das vigas, a que apresentou o melhor desempenho foi o grupo 23 com 20 cm de altura, com

média de MOE de 10025 MPa. Por outro lado, no grupo 22 foi observado a pior média de MOE, 9132 MPa, sendo a altura desses elementos estruturais igual a 15 cm.

7.3 Ensaio de flexão estática a quatro pontos para as vigas de LVL na posição vertical

No ensaio de flexão estática a quatro pontos foram determinados o MOE e o MOR. O valor do MOE determinado para todas as vigas de LVL, na posição vertical, foi resumido por meio de seus grupos, Tabela 7.6. Nessa tabela são apresentados o valor médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada conjunto referente à rigidez.

Tabela 7.6 - Valores estatísticos do MOE de cada grupo de vigas de LVL na posição vertical

Grupo	Quantidade	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
26	3	7423	895	12,06
27	3	6899	225	3,25
28	4	5768	359	6,22
29	4	7666	812	10,60
Média		6939		

Fonte: o autor

Na propriedade mecânica de rigidez, a melhor performance foi observada no conjunto 29, com média de 7666 ± 812 MPa. Por outro lado, o pior resultado aconteceu para o grupo 28, com média de 5768 ± 359 MPa. Verificou-se que os dois grupos possuíam vigas de 3 metros de comprimentos e, portanto, os outros conjuntos possuíam valores intermediários aos já apresentados.

O valor do MOR de todas as vigas de LVL, na posição vertical, foi resumido através de seus grupos, Tabela 7.7. Nessa tabela são destacados o valor médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada grupo referente à resistência. Além disso, a mesma retrata a quantidade de ensaio realizado e o MOR característico.

Tabela 7.7 - Valores estatísticos do MOR de cada grupo de vigas de LVL na posição vertical

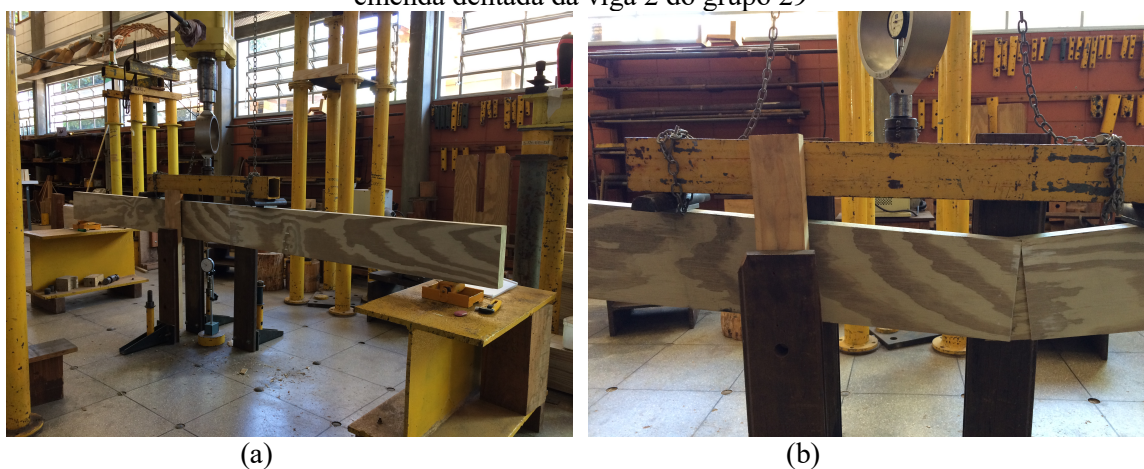
Grupo	Quantidade	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)	MOR _k (MPa)
26	3	26,3	0,3	1,04	25,9
27	3	34,3	3,3	9,56	30,0
28	4	18,3	3,2	17,58	13,7
29	4	24,4	5,4	21,96	17,6
Média		25,8			

Nota: MOR_k: módulo de ruptura característico

Fonte: o autor

Observou-se que os elementos estruturais com comprimento de 2 metros, grupos 26 e 27, alcançaram melhores desempenhos no MOR do que as vigas com 3 metros de comprimento, grupo 28 e 29. O grupo que apresentou a maior média, 34,3 MPa, para essa propriedade foi o grupo 27, enquanto a pior média foi identificada no grupo 28, 18,3 MPa. Os baixos valores nas peças com comprimento de 3 metros, conjunto 28 e 29, têm como principal motivo a presença de emendas dentadas de grandes dimensões na região de momento máximo, Figura 7.11.

Figura 7.11 - Flexão estática: (a) Viga 2, grupo 29, antes da realização do ensaio (b) Ruptura na emenda dentada da viga 2 do grupo 29



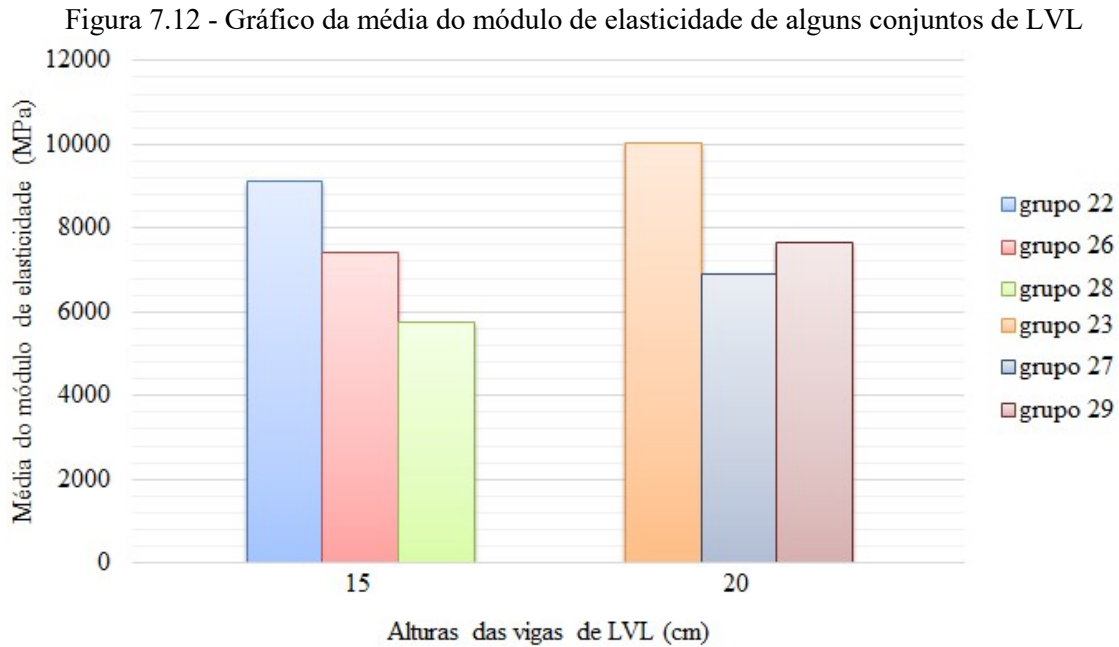
Fonte: o autor

7.4 Comparação das propriedades mecânicas das vigas de LVL

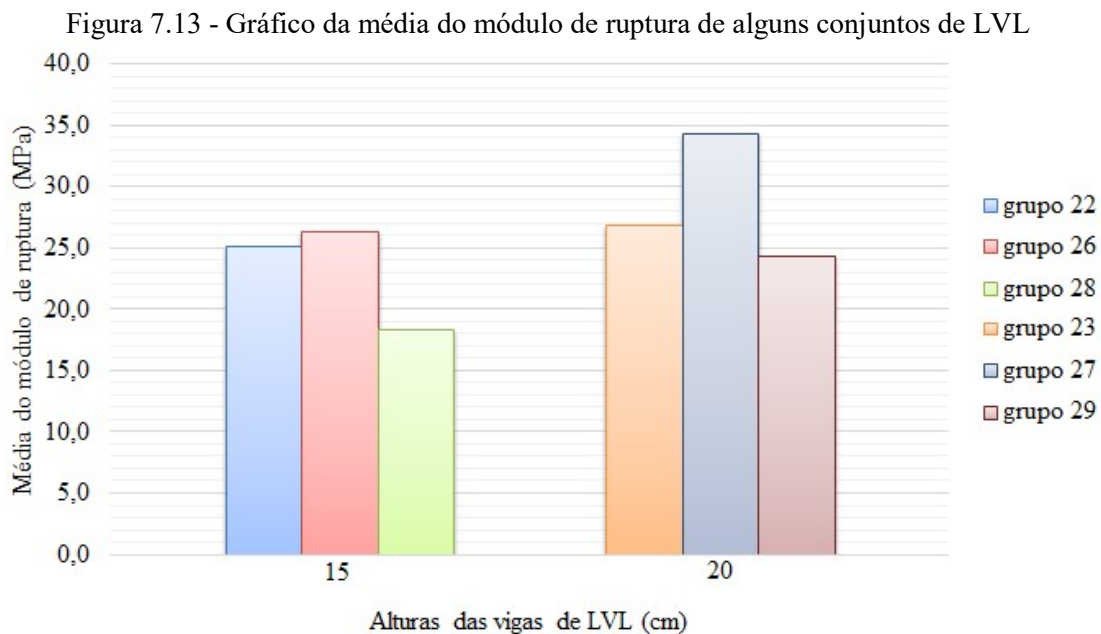
Como as vigas de LVL foram produzidas em duas configurações diferentes de posicionamento de suas lâminas, horizontal e vertical, uma análise comparativa entre a média do MOE e do MOR dos grupos com elementos estruturais de mesma altura, Figura 7.12 e Figura 7.13, foi realizada.

Percebeu-se, a partir da Figura 7.12, que a média do MOE dos conjuntos 22 e 23, posição horizontal, obtiveram melhores desempenhos do que as vigas ensaiadas na posição vertical. Essa diferença, provavelmente, aconteceu devido à produção dos elementos estruturais ter sido feita com distintos painéis. Além disso, não houve uma classificação das lâminas e nem uma padronização na produção dessas placas. Conforme Iwakiri et al. (2010), os painéis produzidos com a mesma faixa de MOE dinâmico das lâminas apresentam um melhor desempenho na posição vertical para a rigidez da peça no ensaio de flexão. Essa melhora da propriedade mecânica também foi constatada nas pesquisas de Bortoletto Júnior

(2010) para a madeira compensada de *Pinus merkussi* e de Palma et al. (2012) para o compensado feito de *Hevea brasiliensis*.



Fonte: o autor



Fonte: o autor

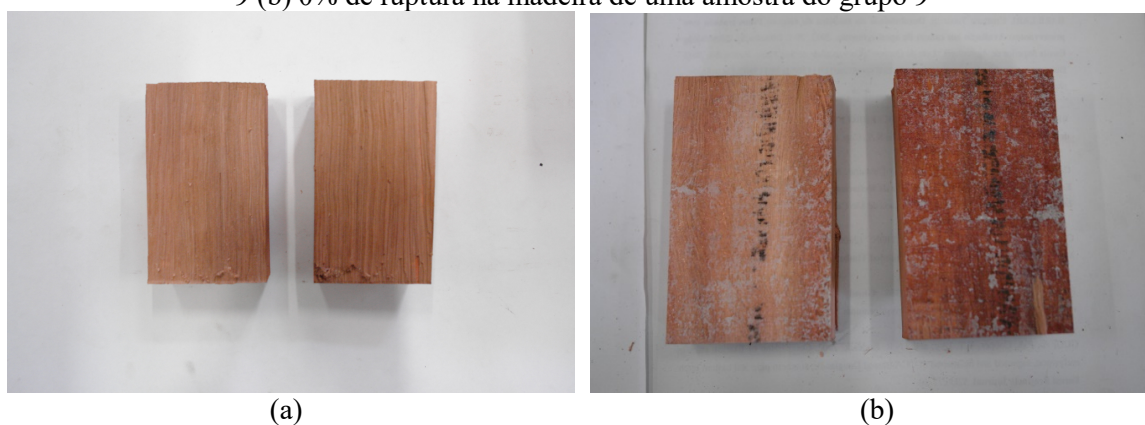
A Figura 7.13 mostrou que as vigas de LVL, posição vertical, sem emendas dentadas, conjuntos 26 e 27, apresentaram melhor média de resistência do que os grupos 22 e 23, posição horizontal, mesmo com suas médias de rigidezes sendo inferior à desses grupos. Esse

benefício também foi demonstrado por Iwakiri et al. (2010), Bortoletto Júnior (2010) e Palma et al. (2012) citados anteriormente. Os conjuntos 28 e 29, devido às uniões dentadas, apresentaram resultados inferiores de média do MOR quando comparado com os outros grupos. Dessa maneira, essas emendas prejudicaram a resistência dos elementos estruturais porque a maioria das falhas aconteceu nessas localidades.

7.5 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras na linha de cola da MLC

A determinação da porcentagem de ruptura na madeira foi realizada visualmente após cada ensaio, Figura 7.14. Desse modo, houve imprecisões nessa medida para cada linha de cola analisada.

Figura 7.14 - Cisalhamento na linha de cola: (a) 100% de ruptura na madeira de uma amostra do grupo 9 (b) 0% de ruptura na madeira de uma amostra do grupo 9



Fonte: o autor

A Tabela 7.8 mostra, para cada grupo de vigas de MLC, o valor da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação da resistência ao cisalhamento paralela às fibras da madeira na linha de cola. Essa tabela, também, mostra a quantidade de ensaios realizados para cada conjunto, além da resistência característica ao cisalhamento paralela às fibras da madeira na linha de cola e a média das porcentagens de falha na madeira (FM).

Tabela 7.8 - Valores estatísticos das resistências ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira na linha de cola e porcentagem de falha na madeira para cada grupo de MLC

Grupo	Quantidade	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)	$f_{v0,k}$ (MPa)	FM (%)
1	66	10,6	1,6	14,88	9,0	76,91
2	40	10,2	1,8	17,31	8,4	94,78
3	49	9,7	1,5	14,96	8,4	92,27
4	27	8,9	1,6	17,52	7,0	98,44
5	34	9,5	1,4	14,28	8,2	95,12
6	49	11,7	2,4	20,12	8,3	82,92
7	49	10,3	3,2	30,76	7,2	68,73
8	100	10,6	2,9	27,17	7,4	92,30
9	158	9,9	2,8	28,63	6,9	82,99
10	80	8,4	1,5	18,12	6,7	95,26
11	79	7,6	1,7	22,83	5,3	100,00

Nota: FM: falha na madeira e $f_{v0,k}$: resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras na linha de cola

Fonte: o autor

Nos grupos de 2 a 5, a média da porcentagem de ruptura na madeira foi superior a 90% para todas as combinações, portanto, foi satisfatório o uso desses adesivos à base de poliuretano nessas vigas de MLC. Outrossim, o grupo 2 apresentou a melhor média de resistência mecânica entre esses grupos, 10,2 MPa. Por outro lado, o conjunto 4, mesmo com uma porcentagem maior de ruptura na madeira, teve o pior desempenho com um valor de 8,9 MPa. Todavia, todos esses conjuntos apresentaram boa média de resistência mecânica para essa propriedade, pois superaram a resistência média de cisalhamento de 7 MPa apresentado na ABNT NBR 7190:1997 para amostras isentas de defeitos dessa espécie.

Os grupos de 6 a 9, compostos por as amostras da espécie de eucalipto urograndis, não apresentaram a mesma resistência característica ao cisalhamento. O conjunto que produziu a maior resistência característica foi o 6, com um valor de 8,3 MPa. Além disso, o grupo 9 apresentou o pior desempenho para essa propriedade, 6,9 MPa, enquanto os grupos 7 e 8 tiveram pequena diferença entre suas resistências e valores intermediários aos outros dois conjuntos.

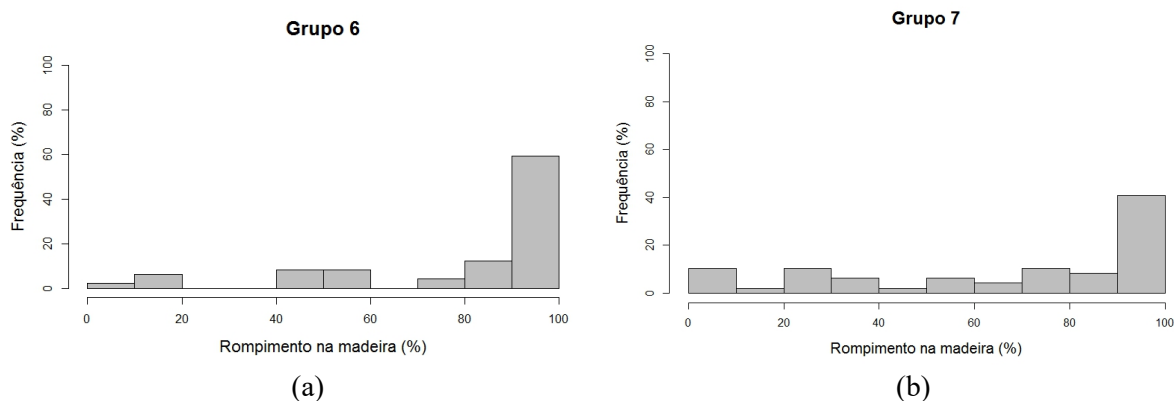
O resultado da resistência característica ao cisalhamento foi diferente entre o grupo 10 e 11. Para as amostras com tratamento químico, o valor característico obtido foi 1,4 MPa menor do que as amostras sem tratamento. Assim, notou-se o uso de lamelas de menor resistência mecânica no conjunto 11. Além disso, pela a análise visual de falha na madeira, os dois grupos alcançaram resultados satisfatórios acima de 90% de média de falha. Dessa

maneira, o tratamento químico da madeira não influenciou nesse parâmetro, pois o grupo 11 atingiu média de ruptura exclusivamente na madeira. Isso demonstrou a boa interação existente entre o adesivo à base de poliuretano com as madeiras das espécies de coníferas e a baixa resistência das lamelas.

A melhor combinação produzida entre todos os materiais foi o grupo 1, que atingiu uma resistência característica de 9 MPa. Porém seu baixo percentual de ruptura na madeira, 76,91%, pode ser um agravante para sua utilização como elemento estrutural na construção civil, especialmente, em ambientes exposto a adversidades climatológicas.

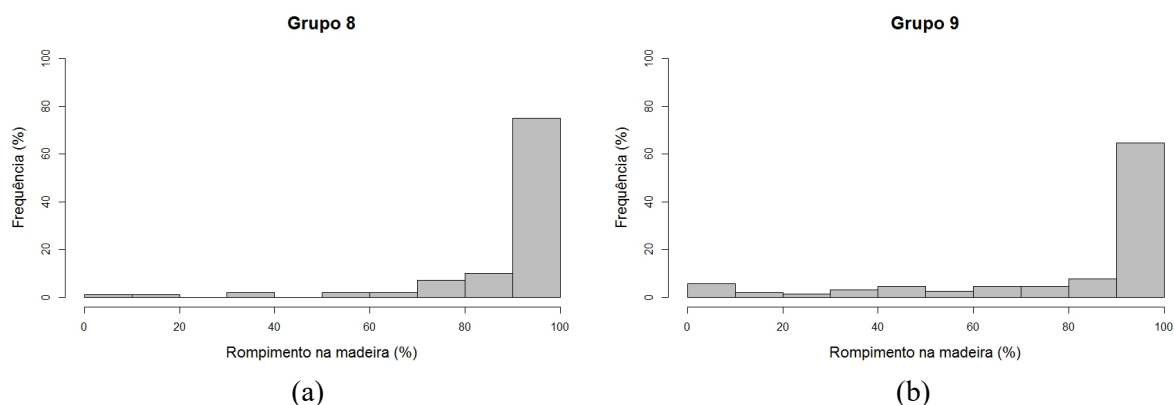
Para uma melhor verificação da porcentagem de rompimento na madeira dos conjuntos de 6 a 9 de eucalipto urograndis, os valores obtidos no ensaio experimental são apresentados em gráficos de frequência relativa para cada combinação, Figura 7.15 e Figura 7.16.

Figura 7.15 - Frequência relativa de falha na madeira: (a) Grupo 6 – MUF 1242/2542 (b) Grupo 7 – MUF 1247/2526



Fonte: o autor

Figura 7.16 - Frequência relativa de falha na madeira: (a) Grupo 8 – Jowat 686.40 (b) Grupo 9 – Jowat 686.40



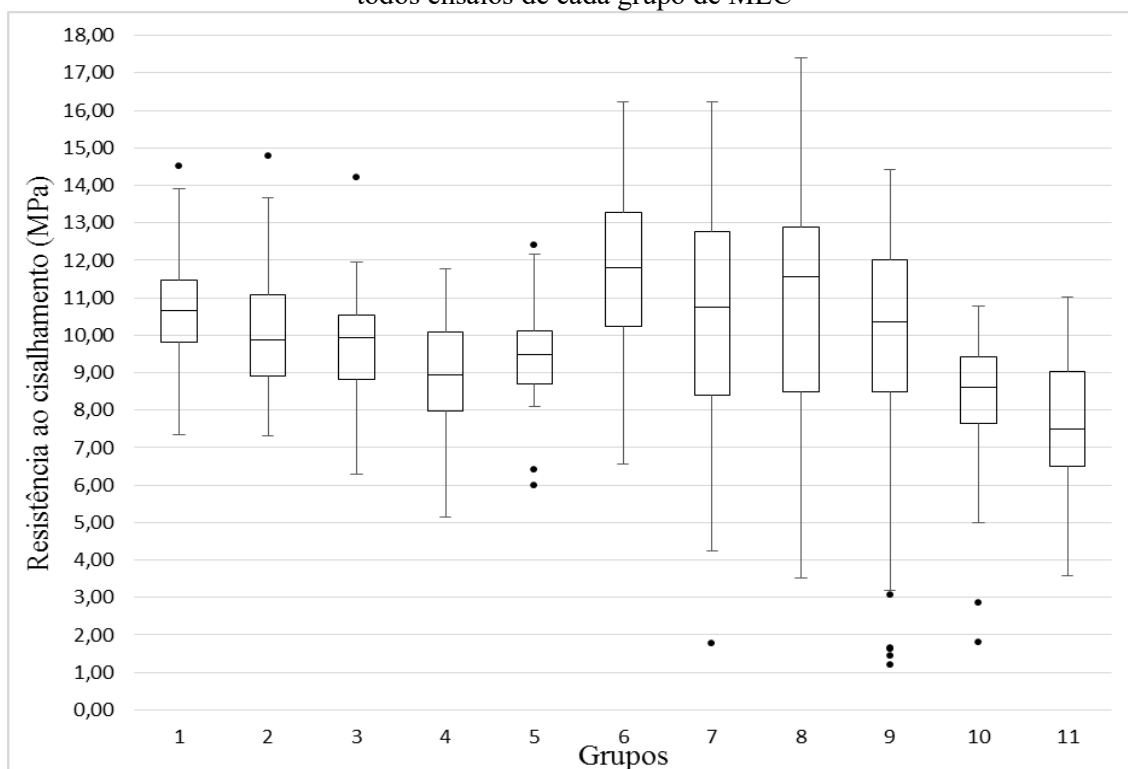
Fonte: o autor

Os grupos 8 e 9, produzidos com o mesmo tipo de adesivo, apresentaram diferença no percentual da frequência, principalmente, na faixa entre 90% a 100% de ruptura na madeira. O conjunto 8 mostrou ter uma melhor adesão, pois 70% das amostras ensaiadas romperam acima de 90% na madeira. No grupo 9 uma parcela significativa da ruptura na madeira foi presenciada abaixo dos 50%. Isso pode ter sido provocado por uma falta de padronização do processo produtivo das vigas pela empresa responsável, uma vez que, esses elementos estruturais tinham menor rigidez do que o grupo 8.

A Figura 7.15 mostra uma grande diferença entre os dois grupos na faixa entre 90% a 100% de ruptura na madeira. O conjunto 6 apresentou maior frequência relativa acima de 90% de falha na madeira com o adesivo de melamina-uréia-formaldeído. Notou-se que o grupo 7 possuiu mais de 40% das rupturas ocorrendo a baixo de 90% de falha na madeira. Esse problema pode ser explicado, novamente, pela falta de padronização do processo produtivo da empresa, pois os elementos estruturais desse conjunto mostraram uma grande frequência de falha no adesivo mesmo com uma rigidez baixa. O MUF apresentou pior resultado de percentual de falha na madeira do que os adesivos à base de poliuretano.

O *box-plot*, Figura 7.17, apresenta os resultados de resistência ao cisalhamento da linha de cola paralela às fibras da madeira para todos os ensaios realizados em cada grupo.

Figura 7.17 – *Box-plot* dos ensaios de cisalhamento na linha de cola paralela às fibras da madeira para todos ensaios de cada grupo de MLC



Fonte: o autor

Os dados de resistência das amostras dos grupos 6 ao 9 apresentaram uma grande variabilidade para cada grupo, Figura 7.17. O processo de produção do grupo 9 foi um pouco inferior ao grupo 8 porque os valores extremos inferiores desse grupo mostraram uma baixa resistência devido à ruptura desse material ser exclusivamente no adesivo. O que valida essa afirmação foi o fato da média de porcentagem desse grupo ter sido menor do que o do segundo. O grupo 6 mostrou os melhores resultados de resistência ao cisalhamento, sendo a dispersão dos dados as menores observadas para essa espécie de madeira, ainda o primeiro quartil foi o maior para essa situação.

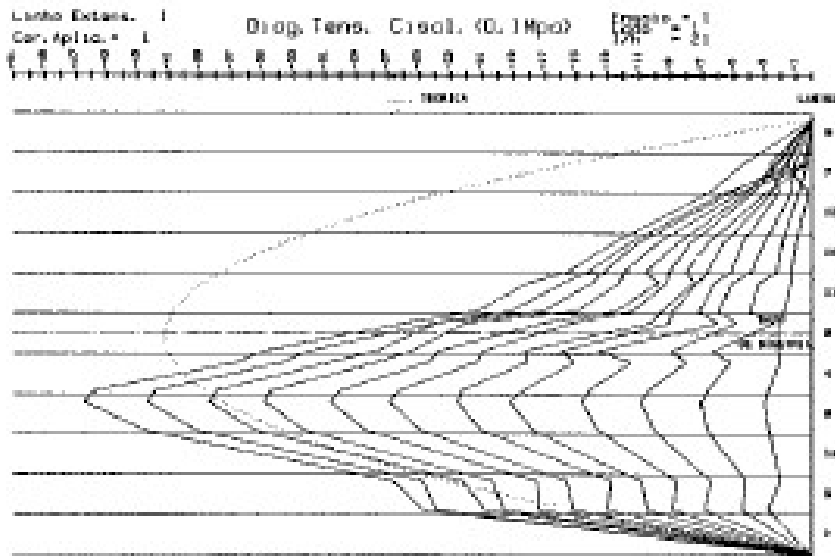
As amostras de *Pinus sp.* do grupo 10 apresentaram as melhores resistências e, também, uma baixa variabilidade quando comparada com o grupo 11. A diferença entre o primeiro quartil e o terceiro para o conjunto 10 foi muito pequeno mostrando uma maior homogeneidade das lamelas usadas entre as vigas.

Os conjuntos feitos de *Eucalyptus grandis*, 2 a 5, exibiram baixa dispersão dos seus resultados. O grupo 4 obteve elevada porcentagem de falha na madeira, porém a dispersão dos seus resultados foi a maior para essa espécie. Provavelmente, as madeiras usadas na produção de cada camada contavam com diferentes propriedades mecânicas. Por outro lado, o grupo 5 apresentou a menor dispersão dos valores entre todos os grupos analisados perante essa propriedade. Em vista disso, as lamelas usadas, possivelmente, tinham características mecânicas parecidas devido à baixa média de ruptura no adesivo. Além disso, o grupo 1, *Tectona grandis*, apresentou pouca variabilidade entre os seus resultados.

7.6 Análise das linhas de colas ao cisalhamento devido sua posição nas amostras

Carrasco (1989), em seu estudo, observou que as tensões de cisalhamento na altura das vigas de MLC tem o formato semelhante a uma parábola, sendo o máximo esforço localizado um pouco abaixo da linha neutra, Figura 7.18. Segundo o autor, houve uma descontinuidade dessa distribuição na linha de cola.

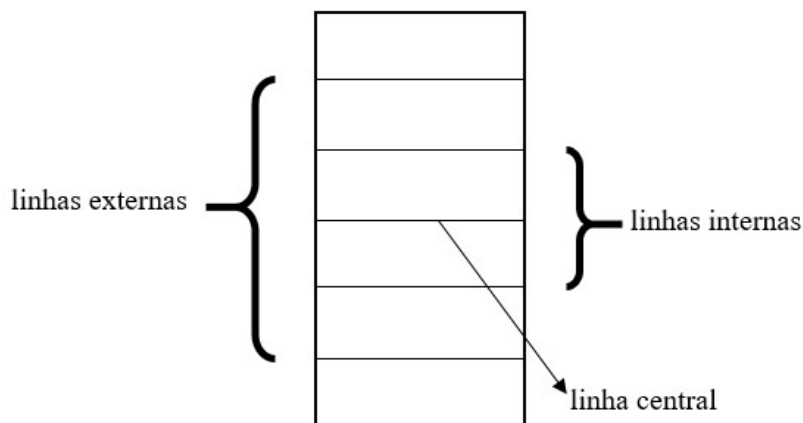
Figura 7.18 - Distribuição de tensões de cisalhamento em uma viga de MLC estudada por Carrasco (1989)



Fonte: Carrasco (1989)

Uma análise da resistência ao cisalhamento da linha de cola foi realizada para constatar se existiu alguma diferença de valores nas linhas de colas considerando sua altura da linha neutra, Figura 7.19. No caso, do número de linhas de colas pares a região central é formada pelas duas linhas de cola mais próxima.

Figura 7.19 - Esquema das linhas de colas para a análise do cisalhamento

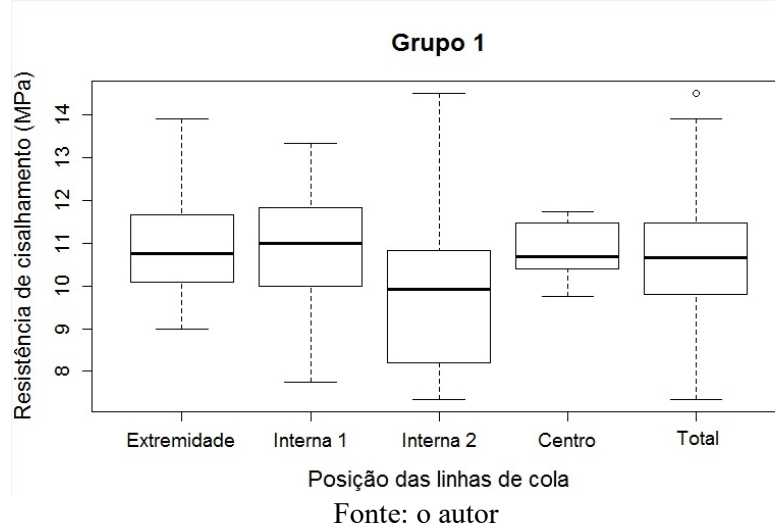


Fonte: o autor

As Figuras (7.20 a 7.30) a seguir mostram a análise feita para todos os conjuntos de MLC estudados, o *box-plot* total corresponde a as resistências das linhas de cola ensaiada para cada grupo. Notou-se na Figura 7.20 que, nas linhas de cola da madeira teca, os valores centrais, além de apresentarem uma menor dispersão dos dados, apresentaram mediana

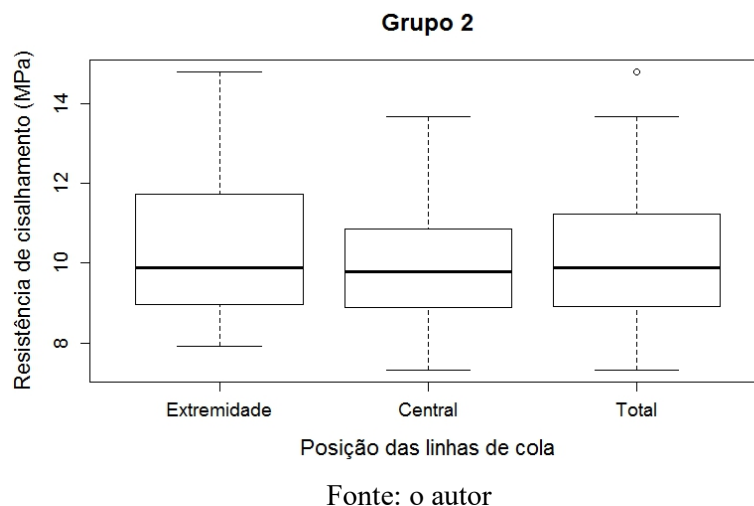
praticamente igual à extremidade do material, a região interna 1 e a de todos os ensaios realizados na madeira. A única mediana que ficou um pouco abaixo das demais foi na região interna 2 localizada próximo ao centro da viga. Isso juntamente com o valor mínimo pode representar uma menor resistência ao cisalhamento da linha de cola para região interna 2 devido à falta de padronização da indústria. Vale ressaltar que, os elementos estruturais foram obtidos conforme a produção da indústria, desse modo, as lamelas não tiveram uma classificação mecânica prévia.

Figura 7.20 - Grupo 1: *box-plot* dos cisalhamentos das linhas de cola dependendo da sua localidade



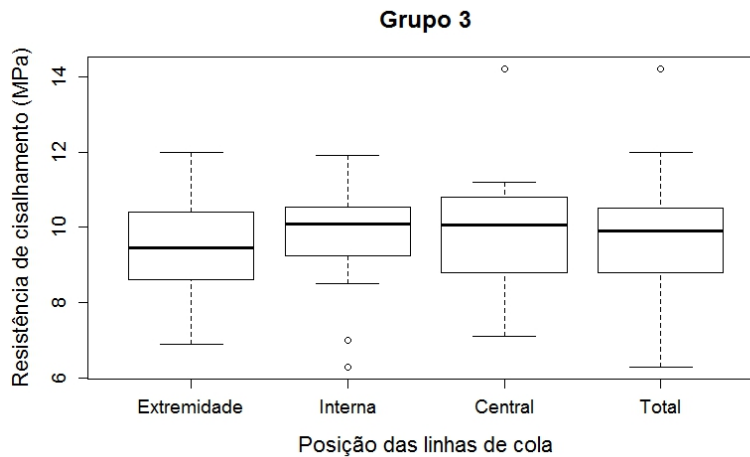
Para o grupo 2, observou-se que a porção central apresentou mediana de resistência ao cisalhamento semelhante as linhas de cola das regiões externas e do total, Figura 7.21. Além disso, nessa análise, a região da extremidade apresentou valores com mais dispersões do que os outros *box-plot*.

Figura 7.21 - Grupo 2: *box-plot* dos cisalhamentos das linhas de cola dependendo da sua localidade



Verificou-se a partir da Figura 7.22 que a região central possuiu mediana bastante semelhante com a da região interna e, também, com a do *box-plot* que reúne todos os ensaios para esse conjunto. A única mediana que ficou um pouco abaixo das demais foi as linhas de cola da região externa das amostras.

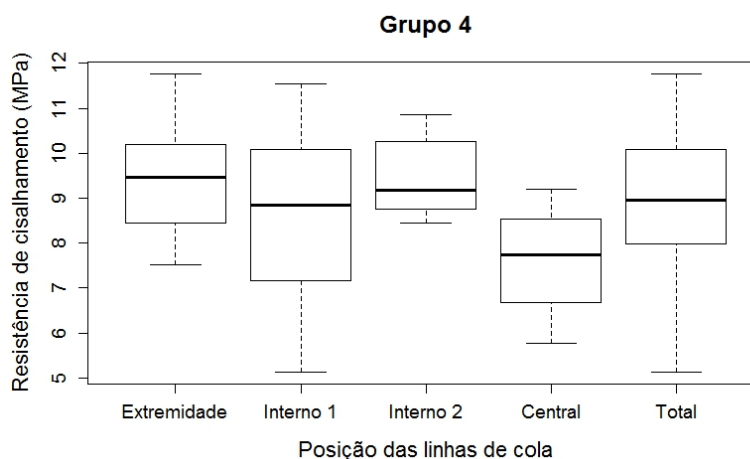
Figura 7.22 - Grupo 3: *box-plot* dos cisalhamentos das linhas de cola dependendo da sua localidade



Fonte: o autor

Percebeu-se na Figura 7.23 que a mediana da região central revelou ser baixa quando comparada com as outras regiões das linhas de cola. As extremidades apresentaram o melhor desempenho para a propriedade mecânica estudada.

Figura 7.23 - Grupo 4: *box-plot* dos cisalhamentos das linhas de cola dependendo da sua localidade

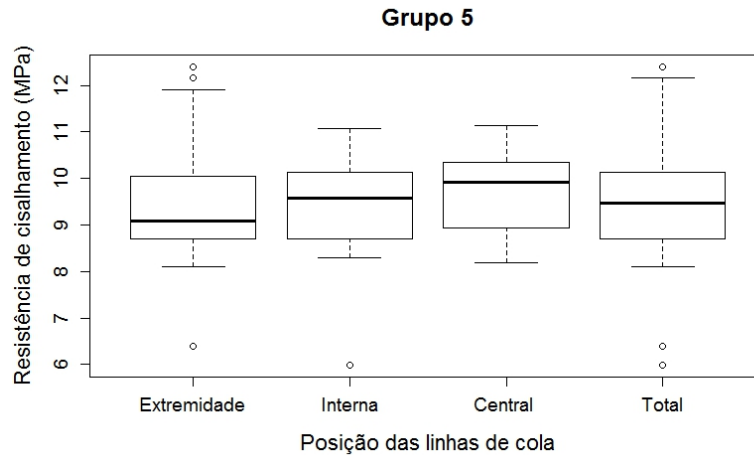


Fonte: o autor

Notou-se pela Figura 7.24 que, nas linhas de cola do conjunto 5, os valores centrais além de apresentarem uma menor dispersão dos dados, apresentaram mediana superior a extremidade do material. A região interna e a de todos os ensaios realizados na madeira. Além

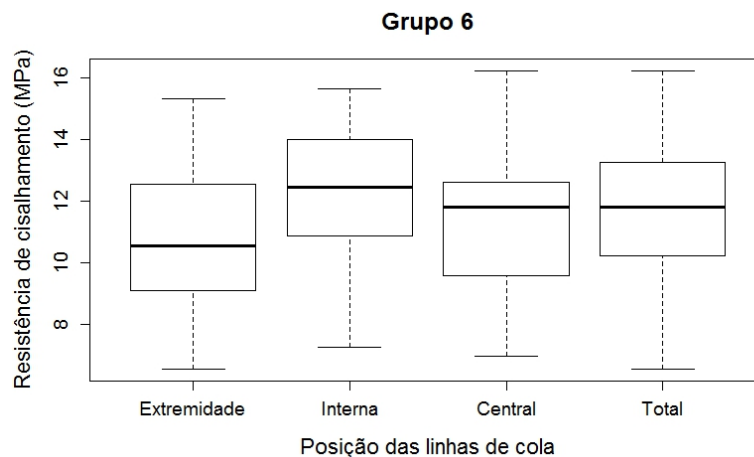
disso, o pior desempenho para esse parâmetro foi observado nas linhas de cola da região externa para esse elemento estrutural.

Figura 7.24 - Grupo 5: *box-plot* dos cisalhamentos das linhas de cola dependendo da sua localidade



Percebeu-se na Figura 7.25 que a mediana e a dispersão da região central foram semelhantes com o total dos ensaios realizado. Além disso, sua mediana mostrou um desempenho melhor do que a extremidade, pior mediana, enquanto ao comparar com a linha de cola da região interna, melhor mediana, seus valores foram próximos.

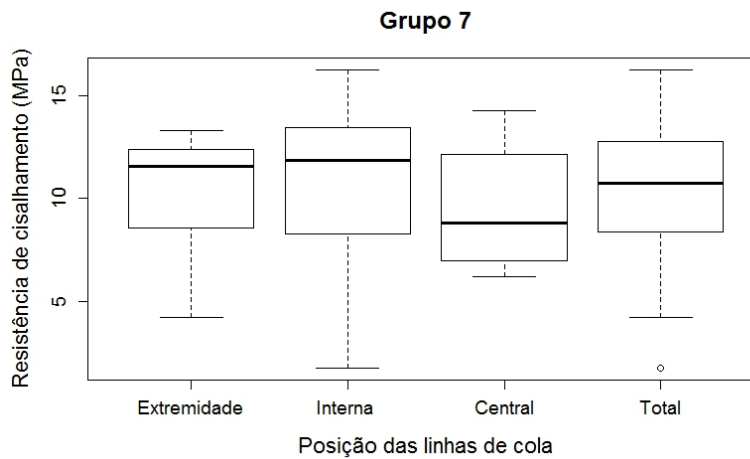
Figura 7.25 - Grupo 6: *box-plot* dos cisalhamentos das linhas de cola dependendo da sua localidade



Para o grupo 7, observou-se pela Figura 7.26 que a porção central apresentou mediana menores de resistência ao cisalhamento do que as linhas de cola das regiões externas, internas e do total, porém a dispersão apresentada foi a menor. Além disso, a melhor mediana foi

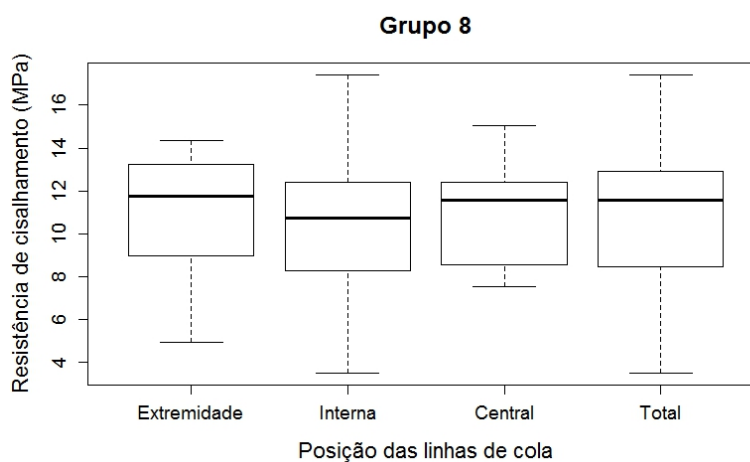
notada para a região interna da linha de cola. Todavia foi a que apresentou a maior dispersão dos resultados.

Figura 7.26 - Grupo 7: *box-plot* dos cisalhamentos das linhas de cola dependendo da sua localidade



Verificou-se, a partir da Figura 7.27, que a região central não possuiu muita dispersão dos seus dados de resistência ao cisalhamento. Outrossim, sua mediana apresentou bastante semelhança com a da extremidade e, também, com a do *box-plot* que reuniu todos os ensaios para esse conjunto. A única mediana que ficou um pouco abaixo das demais foi a linha de cola da região interna das amostras.

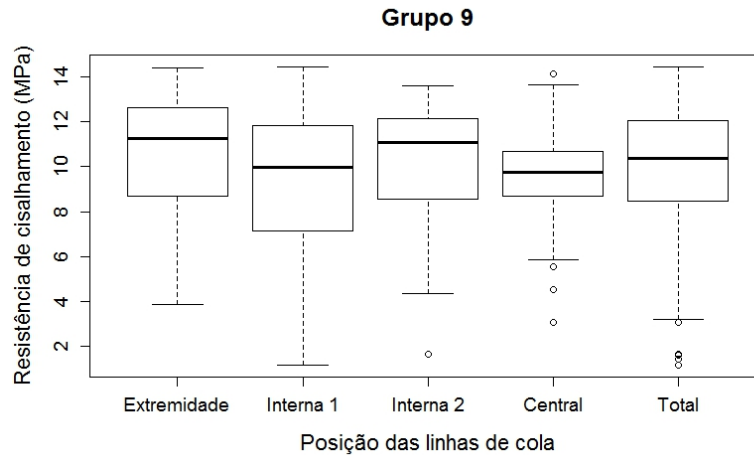
Figura 7.27 - Grupo 8: *box-plot* dos cisalhamentos das linhas de cola dependendo da sua localidade



Notou-se na Figura 7.28 que a região central possuiu mediana semelhante a região interna 1 e próximo de todos os ensaios realizados na madeira, porém a dispersão dos dados

foi a menor para todas as posições das linhas de cola. A maior mediana aconteceu nas linhas de colas das extremidades das amostras seguida pela região interna 2.

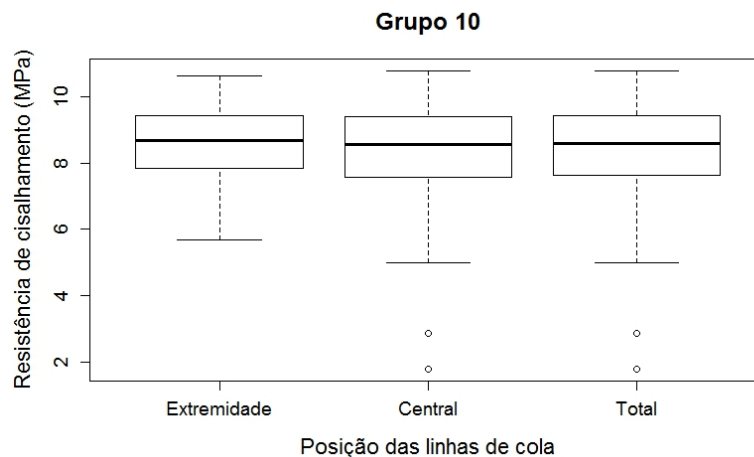
Figura 7.28 - Grupo 9: *box-plot* dos cisalhamentos das linhas de cola dependendo da sua localidade



Fonte: o autor

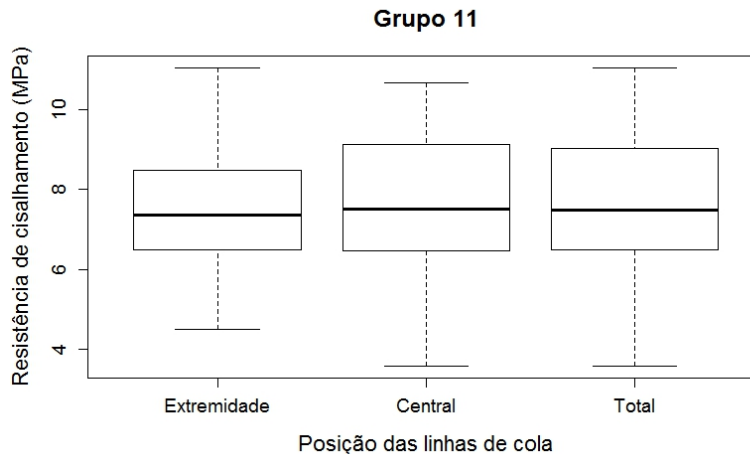
Observou-se na Figura 7.29 que a região central das amostras do conjunto 10 não exibiu muita dispersão dos seus dados de resistência ao cisalhamento perante a extremidade. Outrossim, sua mediana mostrou ser bastante similar a da extremidade e, também, com a do *box-plot* que reuniu todos os ensaios para esse conjunto.

Figura 7.29 - Grupo 10: *box-plot* dos cisalhamentos das linhas de cola dependendo da sua localidade



Fonte: o autor

Percebeu-se pela Figura 7.30 que a mediana e a dispersão da região central foram semelhantes com o total dos ensaios realizados para o grupo 11. Além disso, sua mediana mostrou uma performance melhor do que as linhas de colas localizada nas extremidades.

Figura 7.30 - Grupo 11: *box-plot* dos cisalhamentos das linhas de cola dependendo da sua localidade

Fonte: o autor

Uma semelhança, na maioria dos casos, foi observada entre a mediana da região central e a mediana de todos os ensaios de cada conjunto. Dessa maneira, a quantidade de análise necessária para o controle de qualidade dos elementos estruturais nas empresas pode ser diminuída. Para isso, o fabricante deve utilizar madeira com as mesmas propriedades mecânicas e manter o mesmo padrão de produção para cada viga. Caso sejam atendidas essas recomendações, a verificação pode ser realizada em cinco linhas de cola da região central das amostras onde ocorrem as maiores tensões de cisalhamento nas vigas ao invés de analisar todas as linhas de cola quando as amostras tiverem acima de sete linhas de cola.

7.7 Ensaio de cisalhamento na linha de cola do LVL na posição horizontal

Os valores dessa propriedade mecânica, para as vigas com lâminas na posição horizontal, estão representados de forma concisa na Tabela 7.9. Nesta são mostrado o valor da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação para cada grupo referente à resistência ao cisalhamento normal às fibras da madeira na linha de cola. Essa tabela mostra também a quantidade de ensaios realizados, além da resistência característica ao cisalhamento normal às fibras da madeira na linha de cola e a média da porcentagem de falha na madeira (FM).

Tabela 7.9 - Valores estatísticos das resistências ao cisalhamento normal às fibras da madeira na linha de cola e porcentagem de falha na madeira para cada grupo de vigas de LVL na posição horizontal

Grupo	Quantidade	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	$f_{v90,k}$ (MPa)	FM (%)
21	52	3,0	0,65	21,51	2,3	84,00
22	89	3,1	0,61	19,41	2,5	86,85
23	67	3,1	0,58	18,93	2,3	86,35
24	81	3,0	0,54	18,15	2,4	79,99
25	79	3,0	0,56	18,56	2,3	87,72

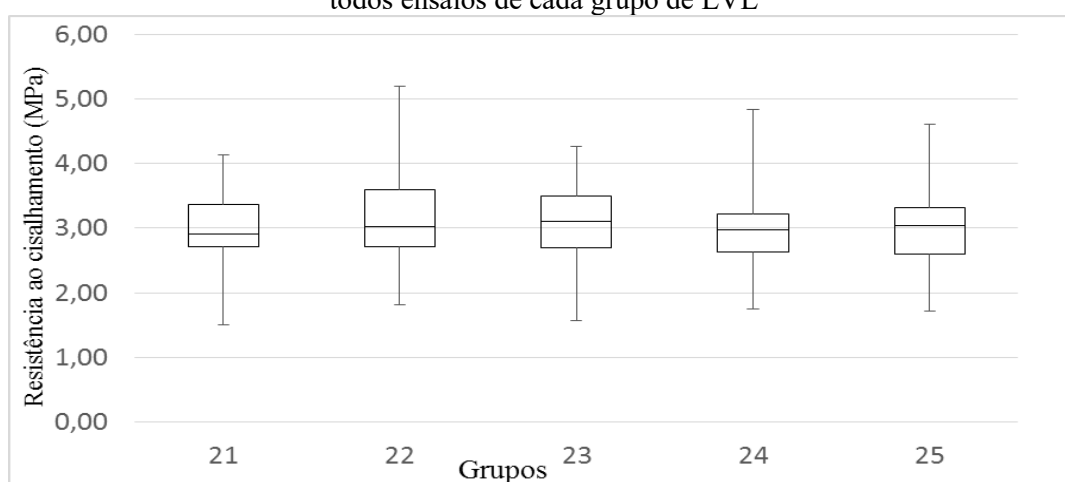
Nota: FM: falha na madeira e $f_{v90,k}$: resistência característica ao cisalhamento normal às fibras da madeira na linha de cola

Fonte: o autor

A resistência ao cisalhamento na linha de cola para os grupos de LVL foi determinado na direção normal às fibras. A princípio essas vigas eram compostas por algumas lâminas com suas fibras dispostas perpendicularmente a direção longitudinal da peça e nessa direção a madeira apresenta uma menor resistência a esse tipo de solicitação.

Como a resistência ao cisalhamento não depende da altura da seção transversal das vigas, os resultados estatísticos calculados para todos os grupos foram muito parecidos, assim como a porcentagem de ruptura na madeira. O valor da resistência característica para cada grupo ficou entre 2,3 a 2,5 MPa, observando a baixa variabilidade do material estudado. Essa característica também foi percebida por meio de um gráfico de *box-plot* apresentando na Figura 7.31. Notou-se que mesmo a madeira utilizada sendo pinus a porcentagem de ruptura da madeira foi inferior a 90%. A Figura 7.32 ilustra a falha na amostra após a realização do ensaio.

Figura 7.31 – *Box-plot* dos ensaios de cisalhamento normal às fibras da madeira na linha de cola para todos ensaios de cada grupo de LVL



Fonte: o autor

Figura 7.32 - Cisalhamento na linha de cola: (a) 50% de ruptura na madeira de uma amostra do grupo 25 (b) 100% de ruptura na madeira de uma amostra do grupo 25



Fonte: o autor

7.8 Ensaio de cisalhamento do LVL na posição vertical

Os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento, para as vigas com lâminas na posição vertical, estão dispostos de forma sucinta na Tabela 7.10. Nesta são mostrados o valor da média, do desvio padrão, do coeficiente de variação e da porcentagem de falha na madeira para cada grupo. Como não foi possível retirar muitas amostras de cada elemento estrutural devido à ruptura no ensaio de flexão estática, somente o grupo 26 teve seu valor característico determinado.

Tabela 7.10 – Valores estatísticos da resistência ao cisalhamento e porcentagem de falha na madeira para cada grupo de vigas de LVL na posição vertical

Grupo	Quantidade	Média (Mpa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)	$f_{v,k}$ (MPa)	WF (%)
26	12	4,9	0,3	6,17	4,8	100
27	6	5,5	0,5	9,10	-	100
28	5	5,7	0,4	6,58	-	100
29	5	5,0	0,4	8,11	-	100

Nota: FM: falha na madeira e $f_{v,k}$: resistência característica ao cisalhamento da madeira

Fonte: o autor

Para os grupos analisados, observou-se que a ruptura ocorreu sempre na madeira devido à aplicação do carregamento ser perpendicular à linha de cola das amostras. Além do mais, o grupo 28 apresentou a melhor média no ensaio de cisalhamento, 5,7 MPa, mesmo com a pior média de rigidez entre as vigas de cada grupo estudado. Enquanto isso, o pior resultado aconteceu para o grupo 26, 4,9 MPa. Ainda, o desvio padrão e o coeficiente de

variação foram muito baixos para todos os grupos. Isso mostra um bom controle de qualidade do produto. Notou-se que a porcentagem de ruptura da madeira foi igual a 100% porque o carregamento foi aplicado em todas as lâminas. A Figura 7.33 ilustra a falha na amostra após a realização do ensaio.

Figura 7.33 – Ensaio de cisalhamento nas amostras de LVL na posição vertical



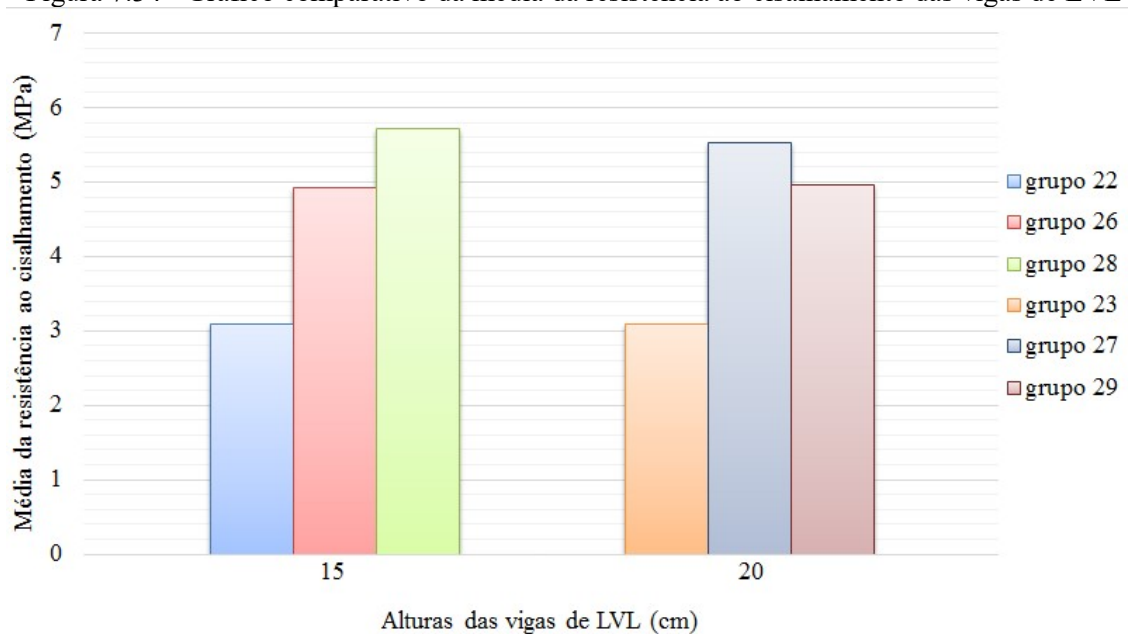
Fonte: o autor

7.9 Comparação entre o cisalhamento nas duas direções do LVL

Como as vigas de LVL foram produzidas em duas configurações diferentes de posicionamento de suas lâminas, horizontal e vertical, uma análise comparativa entre a média de resistência ao cisalhamento dos elementos estruturais com a mesma altura, Figura 7.34, foi realizada. Na configuração horizontal, o ensaio aconteceu nas linhas de colas das lâminas com as fibras da madeira normais ao carregamento, enquanto na outra posição a aplicação da carga foi perpendicular à linha de cola, assim solicitou todas as lâminas das amostras ao mesmo tempo.

Para as amostras estudadas, a posição vertical mostrou maior média de resistência ao cisalhamento do que os corpos de prova solicitados na linha de cola. Dessa maneira, nas vigas com 15 cm de altura, as médias de resistência ao cisalhamento dos conjuntos 26 e 28 foram superiores ao grupo 22 em 58,06% e 83,87%, respectivamente. Nas amostras retiradas das vigas de 20 cm, os conjuntos 27 e 29 superaram em 77,42% e 61,29%, respectivamente, os corpos de prova do grupo 23. Vale destacar que os elementos estruturais na direção vertical possuíam média de rigidez menor do que a posição horizontal. Ainda, no ensaio de cisalhamento, a presença de emendas dentadas, prejudicial no MOR, não interferiu nessa propriedade. Em contraste, Palma et al. (2012) acharam resultados equivalentes nas duas direções para as amostras feitas de *Eucalyptus grandis*.

Figura 7.34 - Gráfico comparativo da média da resistência ao cisalhamento das vigas de LVL



Fonte: o autor

7.10 Ensaio de delaminação da MLC para uso em ambientes externos

7.10.1 Procedimento da norma canadense CSA 112.9:2004

A Tabela 7.11 retrata, para cada grupo de vigas de MLC, exceto o conjunto 9, o valor do comprimento padrão da linha de cola das amostras e a delaminação média em comprimento e em porcentagem da linha de cola. As duas faces considerada para o cálculo da delaminação na amostra pertencem à seção transversal do elemento estrutural.

Os grupos de 2 a 5, compostos por amostras retiradas das vigas de *Eucalyptus grandis*, não passaram no teste de delaminação para exposição externa. Segundo a norma canadense, a porcentagem máxima aceitável de delaminação é de 1,6% para as folhosas. O conjunto 2 mostrou a pior média de delaminação, 11,89%, enquanto o grupo 5 ficou apenas com uma diferença de 3,1% para ser utilizado em ambientes externos. Ademais, o conjunto 1 também não conseguiu atingir a exigência mínima do documento normativo.

Tabela 7.11 - Valores da delaminação para as amostras de MLC

Grupo	Espécie de madeira	Quantidade	Comprimento da linha de cola (cm)	Delaminação (cm)	Delaminação (%)
1	<i>Tectona grandis</i>	10	126,00	9,19	7,29
2	<i>Eucalyptus grandis</i>	10	48,00	5,71	11,89
3	<i>Eucalyptus grandis</i>	10	60,00	4,62	7,70
4	<i>Eucalyptus grandis</i>	4	70,00	4,88	6,96
5	<i>Eucalyptus grandis</i>	8	50,00	2,35	4,70
6	Eucalipto urograndis	10	58,80	2,21	4,10
7	Eucalipto urograndis	10	58,80	1,93	3,50
8	Eucalipto urograndis	30	261,00	87,4	33,50
10	<i>Pinus sp.</i>	30	206,40	6,6	3,20
11	<i>Pinus sp.</i> (com tratamento)	30	206,40	3,6	1,70

Fonte: o autor

Os conjuntos de 6 a 8 não atenderam os requisitos mínimos para serem usados em ambientes externos. O adesivo de poliuretano, Jowapur® 686.40, apresentou a maior média de delaminação, 33,5%, para a madeira de eucalipto urograndis, enquanto as amostras coladas com melamina-uréia-formaldeído mostraram um melhor desempenho.

Para os grupos 10 e 11, compostos por amostras coladas com pinus, os valores obtidos também não satisfizeram as condições mínimas para serem expostos em recintos desprotegidos das intempéries. A norma canadense recomenda, para os adesivos usados em coníferas, no máximo uma abertura de 1%. Observou-se que o conjunto sem tratamento apresentou uma média de porcentagem maior de delaminação do que as amostras com tratamento. Isso pode ser explicado pelo fato das lamelas usadas terem uma maior densidade, uma vez que, a média de rigidez do grupo 10 foi superior ao grupo 11. A Figura 7.35 ilustra as amostras após o ensaio de delaminação.

Figura 7.35 – Ensaio de delaminação: vista geral das amostras



Fonte: o autor

7.10.2 Procedimento do projeto de norma brasileiro ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

Os valores da delaminação para cada viga de MLC do conjunto 9 são apresentados na Tabela 7.12. Nessa tabela é destacado o valor do comprimento da linha de cola e a delaminação em comprimento e em porcentagem de cada amostra. As duas faces considerada para o cálculo da delaminação na amostra pertencem à seção transversal do elemento estrutural.

Houve uma grande diferença de colagem entre as vigas estudadas, sendo a maior delaminação obtida para a peça 1 da viga 7, com um valor de 64,79%. No entanto, a amostra 2 da viga 9 teve uma delaminação de apenas 9,06%, a menor dentro de todo o conjunto. Entre as amostras retiradas das extremidades da mesma viga, notou-se uma diferença na porcentagem de delaminação. A maior discrepância aconteceu no elemento estrutural 4 que atingiu 42,25%. Essas observações mostraram que o processo produtivo não foi satisfatório e, que isso, pode ter acontecido pela diferença de densidade das lamelas utilizadas, da pressão aplicada, tempo de cura e da quantidade de adesivo espalhado entre as lamelas.

A média da porcentagem das amostras estudadas foi de 32,59%. Assim, essas vigas não podem ser aplicadas a ambientes externos, uma vez que, o valor não atendeu o requisito mínimo disposto no projeto de norma, que equivale a 6%, Figura 7.36.

Tabela 7.12 - Valores da delaminação para as amostras de MLC do grupo 9

Viga	Amostra	Comprimento da linha de cola (cm)	Delaminação (cm)	Delaminação (%)
1	1	96	40,10	41,77
1	2	96	32,10	33,44
2	1	96	50,30	52,40
2	2	96	47,30	49,27
3	1	96	35,70	37,19
3	2	96	23,30	24,27
4	1	96	27,70	28,85
4	2	96	52,50	54,69
5	1	96	12,50	13,02
5	2	96	18,90	19,69
6	1	96	21,90	22,81
6	2	96	26,60	27,71
7	1	96	62,20	64,79
7	2	96	49,40	51,46
8	1	96	30,50	31,77
8	2	96	18,20	18,96
9	1	96	9,70	10,10
9	2	96	8,70	9,06
10	1	96	34,10	35,52
10	2	96	24,00	25,00
Média		96	31,29	32,59

Fonte: o autor

Figura 7.36 – Ensaio de delaminação: abertura das linhas de cola do grupo 9



Fonte: o autor

7.11 Ensaio de delaminação do LVL, na posição horizontal, para uso em ambientes externos

A Tabela 7.13 apresenta, para cada grupo de vigas de LVL com lâminas na posição horizontal, o valor do comprimento da linha de cola e a delaminação média em comprimento e em porcentagem de cada conjunto. O procedimento adotado para a determinação da delaminação foi o descrito pela norma CSA 112.9:2004. As duas faces considerada para o cálculo da delaminação na amostra pertencia à seção transversal do elemento estrutural.

Os grupos de 21 a 25, compostos por amostras retiradas das vigas de *Pinus sp.*, apresentaram valores menores do que o máximo permitido para exposição externa dos elementos estruturais. Segundo a norma canadense, a porcentagem máxima aceitável de delaminação é de até 1% para as coníferas. O conjunto 23 mostrou a pior média de delaminação, 0,82%, enquanto o grupo 21 teve a média mais baixa de apenas 0,31%. Notou-se que o processo de fabricação das vigas com o adesivo fenólico apresentou desempenho compatível para uso em recintos externos. A Figura 7.37 apresenta algumas amostras após o ensaio de delaminação.

Tabela 7.13 - Valores da delaminação para as amostras de LVL na posição horizontal

Grupo	Quantidade	Comprimento da linha de cola (cm)	Delaminação (cm)	Delaminação (%)
21	8	2762,58	8,46	0,31
22	10	4290,63	26,86	0,63
23	8	5784,11	47,25	0,82
24	9	7545,34	57,09	0,76
25	7	8119,67	64,22	0,79
Média				0,66

Fonte: o autor

Figura 7.37 – Ensaio de delaminação: amostras do conjunto 21



Fonte: o autor

7.12 Ensaio de delaminação do LVL, na posição vertical, para uso em ambientes externos

A Tabela 7.14 apresenta, para cada grupo de vigas de LVL com lâminas na posição vertical, o valor do comprimento padrão da linha de cola e a delaminação média em comprimento e em porcentagem de cada conjunto. O procedimento adotado para a determinação da delaminação foi o descrito pela norma projeto de norma brasileiro ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5.

Tabela 7.14 - Valores da delaminação para as amostras de LVL na posição vertical

Grupo	Quantidade	Comprimento da linha de cola (cm)	Delaminação (cm)	Delaminação (%)
26	7	480	1,00	0,18
27	2	1000	0	0
28	3	480	0	0
29	3	1000	0	0
Média				0,05

Fonte: o autor

Os conjuntos de *Pinus sp.* combinado com adesivo fenólico mostraram bom desempenho perante o ciclo de vácuo-pressão. Nos conjuntos de 27 a 29 não foi constatado nenhuma delaminação nas faces transversais das amostras e, somente o grupo 26 apresentou uma média de porcentagem de delaminação baixa, 0,18%. Isso mostra que o processo produtivo foi satisfatório para produzir esse tipo de viga para serem expostas em ambientes externos. Todavia, vale ressaltar que só foi ensaiada uma pequena quantidade de amostras devido às rupturas ocasionadas na flexão estática que inviabilizou a extração de mais material.

7.13 Ensaio de tração paralela às fibras nas emendas dentadas de peças estruturais

Os valores das resistências à tração paralela às fibras das emendas dentadas foram resumidos na Tabela 7.15. Essa apresenta o valor da média, o desvio padrão, o coeficiente de variação da resistência, da média da densidade aparente e das resistências características de cada grupo estudado. O modo de ruptura de cada peça estrutural unida por emendas dentadas são mostrados na Tabela 7.16. As peças que foram rompidas na região das garras tiveram seus valores descartados.

Tabela 7.15 – Valores estatísticos da resistência à tração paralela às fibras das emendas dentadas

Grupo	Quantidade	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)	$f_{t0,k}$ (MPa)	Densidade aparente (kg/m ³)
12	10	35,1	9,00	25,67	24,5	623,13
13	10	45,5	7,26	15,96	34,3	621,32
14	8	42,2	6,82	16,15	30,3	615,60
15	10	52,2	11,95	22,90	36,5	806,26
16	11	55,7	8,35	14,98	44,0	841,52
17	10	43,0	8,87	20,64	30,1	753,28
18	10	37,9	7,25	19,15	26,5	694,45
19	10	20,8	6,33	30,38	14,6	452,60
20	7	23,1	5,89	25,46	16,2	459,20

Nota: $f_{t0,k}$: resistência característica à tração paralela às fibras das emendas dentadas

Fonte: o autor

Tabela 7.16 – Modo de ruptura das emendas dentadas

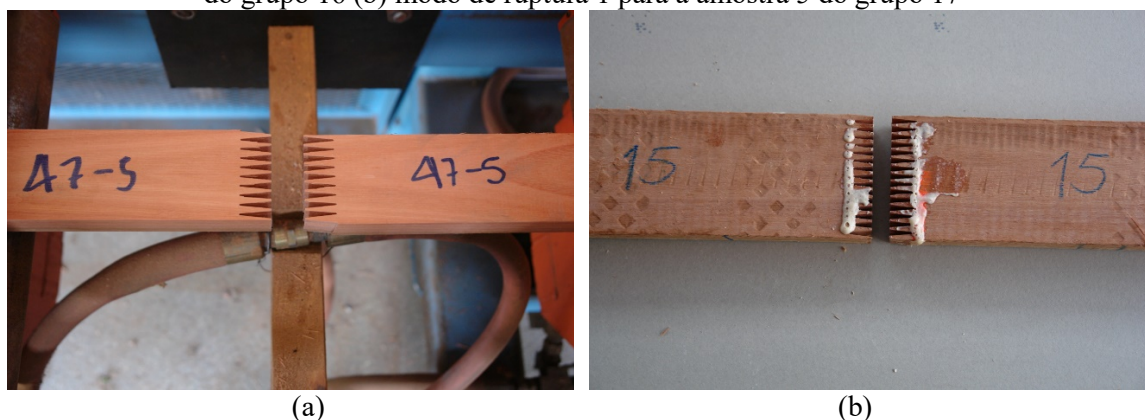
Corpo de prova	Grupo								
	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	Tipo do modo de ruptura								
1	4	1	garra	1	1	1	1	4	garra
2	4	5	1	1	3	1	1	4	garra
3	4	5	garra	1	1	5	1	6/ nó	6
4	5	1	1	1	1	1	1	3	garra
5	1	1	1	1	1	1	1	3	1
6	4	3	1	1	1	1	1	6/ nó	4
7	5	1	1	1	1	5	2	6/ nó	6
8	5	1	1	1	1	1	1	2	1
9	5	1	4	1	1	1	1	1	6/ nó
10	4	1	1	1	1	1	1	4	6
11	-	-	-	-	1	-	-	-	-

Fonte: o autor

Conforme a Tabela 7.15, o melhor desempenho do tipo de adesivo combinado com a madeira de eucalipto urograndis foi obtido com a MUF 1247/2526, grupo 16. Observou-se que as emendas feitas com os adesivos à base de melamina-uréia-formaldeído, grupos 15 e 16, apresentaram melhores médias de resistência do que as emendas dentadas coladas com adesivos à base de poliuretano, grupos 17 e 18. Todavia, a ruptura das emendas dentadas dos grupos 15 a 18 ocorreu, em sua grande maioria, no adesivo, Tabela 7.16 e Figura 7.38, por esse motivo, não se pode tirar conclusões definitivas de qual adesivo foi o melhor para a produção das emendas dentadas. Em vista disso, essa espécie de madeira mostrou uma grande dificuldade em sua colagem, provavelmente, devido à sua alta densidade. Esse problema

também foi relatado no estudo de Molina et al. (2016) para a espécie de *Manilkara huberi*. Segundo os autores, a alta densidade dessa madeira diminuiu a penetração do adesivo no seu interior e, por causa disso, a adesão foi comprometida.

Figura 7.38 - Tração paralela às fibras das emendas dentadas: (a) modo de ruptura 1 para a amostra 5 do grupo 16 (b) modo de ruptura 1 para a amostra 5 do grupo 17



Fonte: o autor

Segundo Pereira et al. (2016), em seu estudo, o valor característico da resistência a tração paralela às fibras do eucalipto urograndis estrutural sem emendas dentadas atingiu 50,73 MPa. Assim, com esse resultado, a melhor eficiência foi alcançada pelo grupo 16, com uma porcentagem 86,73%, enquanto o conjunto 18 apresentou uma eficiência de apenas 52,24%, a pior para as emendas dentadas produzidas com essa espécie de madeira.

A resistência média do grupo 13 e 14 alcançaram 45,5 MPa e 42,2 MPa, respectivamente, valores estes muito abaixo para o material com densidade aparente média de aproximadamente 620 kg/m³. Segundo a ABNT NBR 7190:1997, o *Eucalyptus grandis* possui uma resistência média de tração paralela às fibras de 70,2 MPa para as amostras isentas de defeitos, sem emendas dentadas e com uma densidade aparente média de 640 kg/m³. Assim, a combinação do conjunto 13 apresenta uma resistência média de 64,81% da descrita na norma brasileira e o grupo 14 mostrou uma eficiência de somente 60,11% perante o documento normativo. Desse modo, como a maioria do modo de ruptura foi do tipo um, percebe-se que a adesão na emenda dentada não foi satisfatória, isso pode ter ocorrido devido ao tempo de prensagem, tempo de cura, pressão utilizada e densidade da madeira.

O grupo 12, *Tectona grandis*, mostrou a pior resistência média e característica quando comparado com os grupos 13 e 14 que tinham a mesma densidade aparente média e o mesmo adesivo. Todavia essa redução pode ter sido provocada devido às rachaduras e aos nós presentes na região da ligação e também pela espécie de madeira usada na produção das

emendas. Por outro lado, a predominância do modo de ruptura 4 e 5, no conjunto 12, demonstrou uma boa interação entre o adesivo e o aderente e também um satisfatório tempo de cura e pressão de prensagem realizado pela empresa para essa espécie de madeira.

Nos conjuntos de emendas produzidas com *Pinus sp.*, o grupo 20 apresentou a melhor média da resistência à tração paralela às fibras e também a melhor resistência característica. O grupo 19, em algumas amostras, foi prejudicado nessa propriedade mecânica devido à presença de nós de grandes dimensões no comprimento da peça. Dessa maneira, o modo de ruptura prevaleceu nesses defeitos da madeira proporcionando uma menor resistência para o conjunto, Figura 7.39.

Figura 7.39 - Tração paralela às fibras das emendas dentadas: (a) modo de ruptura no nó para a amostra 6 do grupo 19 (b) modo de ruptura no nó para a amostra 3 do grupo 19



Fonte: o autor

Os grupos 19 e 20, desconsiderando as peças rompidas nos nós, possuíram média de resistência equivalente a 24 MPa e 24,8 MPa, respectivamente. Essa melhora também foi observada nos valores característicos, com o grupo 19 atingindo um valor de 19,6 MPa, enquanto o grupo 20 alcançou um valor de 20,7 MPa. Em vista disso, os dois adesivos à base de poliuretano estudado apresentaram performance semelhante na resistência à tração paralela às fibras nessa espécie de madeira.

7.14 Ensaio de compressão paralela às fibras para as vigas de MLC

Os valores apresentados na Tabela 7.17 representam, para cada grupo de vigas de MLC, o resultado da média da resistência à compressão paralela às fibras, o desvio padrão da população e o coeficiente de variação. Além disso, o número de ensaios realizados e o valor

da resistência característica à compressão paralela às fibras. Para o grupo 4, não foi determinado o valor característico devido ao baixo número de corpos de prova.

Os grupos 6, 8 e 9 atingiram a classe de resistência C60 da ABNT NBR 7190:1997. Por outro lado, o grupo 7 produzido com a mesma espécie de madeira dos grupos anteriores ficou dentro da classe de resistência C40. Um fator que pode ter reduzido a resistência nesse grupo foi o emprego de madeira com menor MOE do que nos outros grupos. Todavia, não foi realizado nenhum tipo de classificação mecânica nas lamelas antes da montagem das vigas.

Tabela 7.17 – Valores da resistência à compressão das vigas de MLC

Grupo	Espécie de madeira	Quantidade	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)	$f_{c0,k}$ (MPa)	Classe de resistência
1	<i>Tectona grandis</i>	10	57,9	1,99	3,44	59,5	40
2	<i>Eucalyptus grandis</i>	10	54,7	3,14	5,74	54,2	40
3	<i>Eucalyptus grandis</i>	10	55,2	2,28	4,12	56,4	40
4	<i>Eucalyptus grandis</i>	4	51,2	3,61	7,05	0	---
5	<i>Eucalyptus grandis</i>	8	56,5	3,51	6,21	55,3	40
6	Eucalipto urograndis	10	75,1	7,94	10,57	67,1	60
7	Eucalipto urograndis	10	68,6	6,16	8,98	58,4	40
8	Eucalipto urograndis	20	70,4	4,27	6,07	70,0	60
9	Eucalipto urograndis	20	65,4	4,75	7,26	63,1	60
10	<i>Pinus sp.</i>	20	33,9	1,82	5,36	34,0	30
11	<i>Pinus sp.</i> (com tratamento)	20	30,8	2,87	9,32	28,2	25

Nota: $f_{c0,k}$: resistência característica à compressão paralela às fibras

Fonte: o autor

A menor rigidez das vigas de *Pinus sp.* do grupo 11 pode ter influenciado na resistência à compressão paralela às fibras, pois enquanto sua classe de resistência foi C25 o grupo 10 obteve uma classificação maior para esse parâmetro, C30.

Os grupos de 2 a 5, com amostras das vigas de *Eucalyptus grandis*, alcançaram uma resistência característica pertencente à classe C40. Além disso, a média de suas resistências superaram a descrita na ABNT NBR 7190:1997, 40,3 MPa, para a mesma espécie de madeira sendo isenta de defeitos. Dessa maneira, o controle de qualidade da empresa para essa

propriedade mecânica foi adequado. Para o conjunto 1, *Tectona grandis*, a classe de resistência atingida foi a C40 da norma brasileira.

Percebeu-se que os grupos 1, 3 e 10 tiveram seus valores característicos maiores do que seus valores médios. Esse problema pode está relacionado com a Equação 6.7 que para resultados muito parecidos apresenta essa tendência, pois o valor final da expressão das resistências entre os parênteses é multiplicado por 1,1, ou seja, um aumento de 10%.

7.15 Ensaio de compressão paralela às fibras para as vigas de LVL

Os resultados dos ensaios de compressão paralela às fibras das vigas de LVL, posição horizontal, são apresentados de forma resumida na Tabela 7.18. Esta mostra a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dessa propriedade mecânica para cada conjunto. Além disso, como a quantidade de ensaios realizada para cada grupo foi limitado, não foi possível determinar a resistência característica e, conseqüentemente, não houve o enquadramento do material em uma classe de resistência.

Tabela 7.18 – Valores estatísticos da resistência a compressão das vigas de LVL horizontal

Grupo	Quantidade	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
21	4	34,4	4,29	12,48
22	5	36,6	0,84	2,29
23	4	35,9	3,43	9,58
24	4	37,7	0,99	2,62
25	5	37,1	2,19	5,90
Média		36,3		

Fonte: o autor

Observou-se, a partir da Tabela 7.18, que os coeficientes de variação foram muito baixos, provavelmente, devido ao bom controle de qualidade da empresa, assim como aconteceu para o desvio padrão. O melhor desempenho, para o ensaio de compressão paralela às fibras, foi presenciado no conjunto 24, com um valor médio de 37,7 MPa. Por outro lado, o grupo 21 apresentou a pior média, 34,4 MPa, entre todos os conjuntos analisados. Para a média dessa propriedade mecânica, os grupos 22 a 25 atingiram a classe de resistência C25 ABNT NBR 7190:1997, enquanto o grupo 21 alcançou a classe C20.

Os resultados dos ensaios de compressão paralela às fibras das vigas de LVL, posição vertical, são apresentados de forma resumida na Tabela 7.19. Esta mostra a média, o desvio

padrão e o coeficiente de variação dessa propriedade mecânica para cada conjunto. Ademais, como a quantidade de ensaio realizado para cada grupo foi limitado, não foi possível determinar a resistência característica e, conseqüentemente, não houve o enquadramento do material em uma classe de resistência.

Na Tabela 7.19, os coeficientes de variação foram muito baixos, provavelmente, devido ao bom controle de qualidade da empresa, assim como aconteceu para o desvio padrão. Todavia, o conjunto 28 mostrou valores elevados para esses dois dados estatísticos. A melhor performance, para o ensaio de compressão paralela às fibras, foi observada nos conjuntos 26 e 29, com um valor médio de 29,9 MPa. Por outro lado, o grupo 28 apresentou a pior média, 25,6 MPa, entre todos os conjuntos analisados. Para a média dessa propriedade mecânica, os grupos 27 e 28 não atingiram nenhuma classe de resistência da ABNT NBR 7190:1997, enquanto os grupos 26 e 29 alcançaram a classe C20.

Tabela 7.19 - Valores estatísticos da resistência a compressão das vigas de LVL vertical

Grupo	Quantidade	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
26	4	29,9	2,4	8,03
27	4	27,2	0,5	1,74
28	2	25,6	6,5	25,52
29	2	29,9	2,6	8,83
Média		28,1		

Fonte: o autor

8 CONCLUSÕES

Os métodos de ensaios propostos pelos projetos de norma brasileiro, ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 e ABNT NBR ISO PN 02:126.10-001-3 baseados nas normas europeias, EN 14080:2013 e EN 408:2010, e na ISO 13910:2013, mostraram ser eficientes para sua aplicação no controle de qualidade da produção de elementos estruturais de produtos engenheirados de madeira colada, principalmente, para as vigas de MLC e de LVL.

O dispositivo desenvolvido, Figura 6.9, mostrou ser adequado para determinar a resistência ao cisalhamento da linha de cola. O giro que pode provocar o rompimento das linhas de colas adjacentes ocorreu em raríssimas ocasiões para esse dispositivo, todavia as amostras devem ser confinadas com a mesma altura do dispositivo, 10 cm, ou seja, não deixando espaço entre a amostra e sua parte superior.

A redução da quantidade de ensaios de cisalhamento realizados nas amostras pode ser feita devido à homogeneidade da variabilidade dos resultados e da mediana das linhas de colas observada para todos os grupos estudados. Todavia, a densidade da madeira usada tem que ser semelhante para todas as lamelas das vigas. Além disso, para a região central onde ocorrem os maiores esforços de cisalhamento precisa ser verificada a sua resistência.

Na delaminação, a metodologia do projeto de norma brasileira apresentou bons resultados e mostrou ser mais prático do que o método canadense devido o menor tempo necessário para a realização de todo o ensaio, sendo a diferença total de tempo de 11 dias entre os dois procedimentos.

As emendas dentadas provocaram uma redução do MOR em alguns conjuntos de MLC e de LVL. No grupo 8 essa redução alcançou 29,61% em relação as vigas do conjunto 7. Além disso, o modo de ruptura das vigas com emendas, em sua grande maioria, aconteceu por conta da tração nessas ligações.

O posicionamento das lâminas nas vigas analisadas de LVL foi um fator determinante nos valores das resistências de flexão e cisalhamento. A posição vertical mostrou um melhor desempenho na flexão estática para os conjuntos 26 e 27, sem emendas, diante das vigas com a mesma altura na posição horizontal. Além disso, a resistência ao cisalhamento de todos os grupos retirados das vigas verticais forneceram maiores valores de resistências do que o outro tipo de posicionamento. O ganho observado nessa propriedade foi de cerca de 2 MPa para todos as amostras. Essa melhoria foi proporcionada devido a solicitação em todas as lâminas

que compreendia a seção transversal da viga, enquanto que, na outra posição só ocorreu o carregamento na linha de cola.

Os resultados obtidos nos ensaios de delaminação e nos ensaios de tração revelaram que os eucaliptos são madeiras de difícil colagem, devido à sua alta densidade. Isso ficou comprovado pela frequência elevada de ruptura na linha de cola das emendas dentadas e, também, por causa da porcentagem de delaminação observada.

A colagem do LVL para os conjuntos apresentou um bom desempenho com delaminação abaixo de 1%.

Recomendações para trabalhos futuros:

- a) Aplicar o método de ensaio em espécie de madeira tropical;
- b) Realizar ensaios comparativos com as normas de outros países;
- c) Aplicar o método de ensaio para outras combinações de madeira e adesivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGER, R. T. Survey of polyurethane adhesives. **International Journal Adhesion and Adhesives**, v. 4, n. 4-4, p. 151-152, 1984.

AKZO NOBEL. **Boletim Técnico – MUF 1242/2542**. Akzo Nobel. p. 6, 2001.

AKZO NOBEL. **Boletim Técnico – MUF 1247/2526**. Akzo Nobel. p. 6, 2001.

ALBINO, V. C. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Influência das características anatômicas e do teor de extrativos totais da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden na qualidade da colagem. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 4-4, p. 803-811, 2012.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198**: Standard test of static tests of lumber in structural sizes. West Conshohocken, PA, 2014.

_____. **ASTM D2559**: Standard specification for adhesives for structural laminated wood products for use under exterior (wet use) exposure conditions. West Conshohocken, PA, 2004.

_____. **ASTM D3535**: Standard test method for resistance to creep under static loading for structural wood laminating adhesives used under exterior exposure conditions. West Conshohocken, PA, 2007.

_____. **ASTM D4668**: Standard test method for evaluating structural adhesives for finger jointing lumber. West Conshohocken, PA, 2014.

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

_____. **CEE-126 PN 02:126.10-0001-3**: Madeiras – Ensaio de caracterização de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **CEE-126 PN 02:126.10-0001-5**: Madeira laminada colada estrutural: métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2005**. Brasília, p.80, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico ABRAF 2013: ano base 2012**. Brasília, p.148, 2013.

APA – The Engineered Wood Association's. **Glulam Product Guide**. Tacoma, Washington 2008.

AYARKWA, J.; HIRASHIMA, Y.; SASAKI, Y.; YAMASAKI, M. Influence of finger-joint geometry and end pressure on tensile properties of three finger-jointed tropical African hardwoods. **The Southern African Forestry Journal**, v. 188, p. 37-49, 2010.

AZAMBUJA, M. A. **Avaliação do adesivo poliuretano a base de mamona para fabricação de madeira laminada colada (MLC)**. 2002. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

AZAMBUJA, M. A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 2006. 128 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

AZAMBUJA, M. A.; CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A.; FIORELLI, J.; CARRASCO, E. V. M.; DUARTE, R. S.; DIAS, G. L.; SZÜCZ, C. A.; VALLE, A. Proposta de normalização para madeira laminada colada (MLC). **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 5. n. 13, 2004.

BAIER, R. E.; SHAFRIN, E. G.; ZISMAN, W. A. Adhesion: mechanisms that assist or impede it. **Science**, v. 162, p. 1360-1368, 1968.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. 1ª ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.

BONO, C. T. **Madeira laminada colada na arquitetura: sistematização de obras executadas no Brasil**. 1996. 247 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Effects of ply grading and assembly on the properties of plywood panels from *Pinus merkussi*. **Cerne**, v. 16, n. 2-5, p. 145-153, 2010.

BRASHAW, B. K. Ultrasonic veneer grading. In: ROSS, R. J. (Ed.). **Nondestructive Evaluation of Wood**: second edition. 2nd ed. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2015. cap. 10, p. 109-114.

BRASHAW, B. K.; WANG, X.; ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. Relationship between stress wave velocities of green and dry veneer. **Forest Products Journal**, v. 54, n. 6, p. 85-89, 2004.

BURDURLU, E.; KILIC, M.; ILCE, A. C.; UZUNKAVAK, O. The effects of ply organization and loading direction on bending strength and modulus of elasticity in laminated veneer lumber (LVL) obtained from beech (*Fagus orientalis* L.) and lombardy poplar (*Populus nigra* L.). **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 8-12, p. 1720-1725, 2007.

CALIL JUNIOR, C.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 1, n. 1, p. 71-77, 1997.

CALIL NETO, C. **Madeira Laminada Colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CALIL NETO, C.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; CALIL JUNIOR, C. Analysis of specie – treatment – adhesive combinations for glulam purpose. **International Journal of Materials Engineering**, v. 4, n. 1-6, p. 41-47, 2014.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 0112.9**: Evaluation of adhesives for structural wood products (exterior exposure). Mississauga, 2004.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 0112.10**: Evaluation of adhesives for structural wood products (limited moisture exposure). Mississauga, 2007.

CARRASCO, E. V. M. **Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada (MLC)**. 1989. 347 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

CARVALHO, A. M.; LAHR, F. A. R.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Use of Brazilian eucalyptus to produce LVL panels. **Forest Products Journal**, v. 54, n. 11, p. 61-64, 2004.

CAVALHEIRO, R. S. **Madeira Laminada Colada de Schizolobium amazonicum Herb. (Paricá): combinação adesivo/tratamento preservante**. 2014. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CHOONG, E. T.; TESORO, F. O.; MANWILLER, F. G. Permeability of twenty-two small diameter hardwoods growing on southern pine sites. **Wood and Fiber Science**, v. 6, n. 1-4, p. 91-101, 1974.

ÇOLAK, S.; ÇOLAKOĞLU, G.; AYDIN, I. Effects of logs steaming, veneer drying and aging on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL). **Building and Environment**, v. 42, n. 1–12, p. 93-98, 2007.

COMSTOCK, G. L. Directional permeability of softwoods. **Wood and Fiber Science**, v. 2, n. 4-4, p. 283-289, 1970.

COMSTOCK, G. L.; CÔTÉ JR., W. A. Factors affecting permeability and pit aspiration in coniferous sapwood. **Wood Science and Technology**, v. 2, n. 4-4, 279-291, 1968.

DAVIS, G. The performance of adhesive systems for structural timbers. **International Journal Adhesion and Adhesives**, v. 17, n. 3-4, p. 247-255, 1997.

DUNKY, M. Adhesives in the Wood Industry. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of Adhesives Technology**: second edition, revised and expanded. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. cap. 47.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 301**: Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures – Classification and performance requirements. Brussels, 2013.

_____. **EN 385**: Finger-jointed structural timber – Performance requirements and minimum production requirements. Brussels, 2001.

_____. **EN 391**: Glued laminated timber – Delamination test of glue lines, Brussels, 2001.

_____. **EN 408**: Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. Brussels, 2011.

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

FIGLIARELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FOLLRICH, J.; TEISCHINGER, A.; GINDL, W.; MÜLLER, U. Adhesive bond strength of end grain joints in softwood with varying density. **Holzforschung – International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood**, v. 62, n. 2-6, p. 237-242, 2008.

FREAS, A. D. **Studies of the strength of glued laminated wood construction**. Wisconsin: Forest Products Laboratory, Forest Service, U. S. Department of Agriculture, 1949. 7 p. Relatório técnico, No. R1749.

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

GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; PROTÁSIO, T. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES, B. M. R.; SIQUEIRA, H. F. Qualidade de painéis LVL produzidos com madeira de clones de *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 83, p. 307-313, 2015.

HSE, C.; KUO, M. Influence of extractives on wood gluing and finishing - a review. **Forest Products Journal**, v. 38, p. 52-56, 1988.

ICIMOTO, F. H. **Dormentes em Madeira Laminada Colada de Pinus oocarpa**. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

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

ISSA, C. A.; KMEID, Z. Advanced wood engineering: glulam beams. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 2-10, p. 99-106, 2005.

IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; PINTO, J. A.; VIANA, L. C.; SOUZA, M. M.; TRIANOSKI, R.; ALMEIDA, V. C. Produção de painéis de laminados unidirecionais – LVL com lâminas de *Schizolobium amazonicum*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*. **Cerne**, v. 16, n. 4-5, p.557-563, 2010.

JESUS, J. M. H. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 2000. 109 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

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

KNORZ, M.; NEUHAEUSE, E.; TORNO, S.; KUILEN, J. Influence of surface preparation methods on moisture-related performance of structural hardwood-adhesive bonds. **International Journal of Adhesion e Adhesives**, v. 57, p. 40-48, 2015.

LAM, F.; PRION, H. G. L. Engineered Wood Products for Structural Purposes. In: THELANDERSSON, S.; LARSEN, H. J (Ed.). **Timber Engineering**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2003. cap. 6, p. 81-102.

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

LEHMANN, M.; SCHLEGEL, S.; AMMANN, S.; BEYER, M.; AEHLIG, K.; JUNG, H.; NIEMZ, P. Investigation of the bond quality of semi industrially produced ash glulam. In: World Conference on Timber Engineering, 2016, Vienna. **Anais...** Vienna: TU Verlag, 2016.

LIMA, C. K. P.; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; CARNEIRO, A. C. O. Características anatômicas e química da madeira de clones de *Eucalyptus* e sua influência na colagem. **Cerne**, v. 13, n. 2-5, p. 123-129, 2007.

LIMA, N. N.; MENDES, L. M.; SÁ, V. A.; BUFALINO, L. Propriedades físico-mecânicas de painéis LVL produzidos com três espécies amazônicas. **Cerne**, v. 19, n. 3-4, p. 407-413, 2013.

LUTZ, J. F. **Wood veneer: log selection, cutting, and drying**. Wisconsin: Forest Products Laboratory, Forest Service, U. S. Department of Agriculture, 1978. p. 137. Boletim técnico, No. 1577.

MACÊDO, A. N. **Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): avaliação de método de ensaio**. 1996. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

MACÊDO, A. N. **Fadiga de emendas dentadas em madeira laminada colada**. 2000. 201 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MACÊDO, A. N.; DIAS, A. A.; BARATA, T. Q. F. Madeiras tropicais da Amazônia como alternativa para aplicação em madeira laminada colada (MLC). In: Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira, 7., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: IBRAMEM, 2000.

MACÊDO, A. N.; RAMOS, M. A.; FERNANDES, M. C. O.; BENTES, J. L. Espécies de madeira da região Amazônica possibilidade de aplicação na tecnologia da madeira laminada colada. In: Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira, 11. 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: IBRAMEM, 2008.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. **Noções de probabilidade e estatística**. 7ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2015. 408 p.

MARTINS, G. C. A. **Análise numérica e experimental de vigas de madeira laminada colada em situação de incêndio**. 2016. 197 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

MENEZZI, C.; MENDES, L.; SOUZA, M.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Effect of nondestructive evaluation of veneers on the properties of laminated veneer lumber (LVL) from a tropical species. **Forests**, v. 4, n. 2-4, p. 270-278, 2013.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto**: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro. 2009. 325 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MOLINA, J. C.; CALIL NETO, C.; CALIL JUNIOR, C.; CHRISTOFORO, A. L. Avaliação do comportamento de vigas retangulares (LVL) com laminação horizontal e vertical. **Revista Madeira Arquitetura & Engenharia**, v. 14, n. 35, p. 11-14, 2013.

MOLINA, J. C.; CALIL NETO, C.; CHRISTOFORO, A. L. Resistência à tração de emendas dentadas de madeira de *Manilkara huberi* para o emprego em madeira laminada colada. **Ambiente contruído**, v. 16, n. 1, p. 221-227, 2016.

MOODY, R. C.; HERNANDEZ, R.; LIU, J. Y. Glued Structural Members. In: Forest Products Laboratory. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. cap. 11.

MOREDO JR., C. C.; SAKUNO, T. Effects of apitong (*Dipterocarpus spp.*) extractives on bond strength development and curing rate of adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 11, n. 4-4, p. 228-234, 1991.

MÜLLER, M. T.; HASELEIN, C. R.; MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M. Influência de diferentes combinações de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* em painéis LVL. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1-4, p. 153-164, 2015.

NADIR, Y.; NAGARAJAN, P. The behavior of horizontally glued laminated beams using rubber wood. **Construction and Building Material**, v. 55, p.398-405, 2014.

OHNESORGE, D.; RICHTER, K.; BECKER, G. Influence of wood properties and bonding parameters on bond durability of European Beech (*Fagus sylvatica* L.). **Annals of Forest Science**, v. 67, n. 6-8, 2010.

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

ÖZÇİFCİ, A.; YAPICI, F. Structural performance of the finger-jointed strength of some wood species with different joints configurations. **Construction and Building Material**, v. 22, n. 7-12, p.1543-1550, 2008.

PALMA, H. A. L.; BALLARIN, A. W. Propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3-4, p. 559-566, 2011.

PALMA, H. A. L.; ESCOBAR, J. F.; BALLARIN, A. W.; LEONELLO, E. C. Influência da qualidade das lâminas no desempenho mecânico à flexão de painéis compensados de *Hevea brasiliensis*. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 2-4, p. 133-140, 2012.

PARRA-SERRANO, L. J.; PIVA, M. E. M.; SERVULO FILHO, H. J.; LIMA, I. L.; GARCIA, J. N. Viabilidade do uso da madeira de *Hevea brasiliensis* para fabricação de vigas laminadas coladas. In: Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira, 13., 2012, Vitória. **Anais...** Vitória: IBRAMEM, 2012.

PEREIRA, M. C. M.; CALIL NETO, C.; ICIMOTO, F. H.; CALIL JUNIOR, C. 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**, v. 19, n. 6-6, p. 1270-1275, 2016.

PIZZI, A. Melamine-formaldehyde adhesives. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of Adhesives Technology**: second edition, revised and expanded. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. cap. 32.

_____. Phenolic resin adhesives. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of Adhesives Technology**: second edition, revised and expanded. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. cap. 26.

PLOMLEY, K. F.; HILLIS, W. E.; HIRST, K. The influence of wood extractives on the glue-wood bond. I. The effect of kind and amount of commercial tannins and crude wood extracts on phenolic bonding. **Holzforschung – International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood**, v. 30, n. 1-6, p. 14-19, 1976.

PURBOND. **Boletim Técnico – Purbond® HB S109**. Purbond. p. 4, 2007.

RAKNES, E. Durability of structural wood adhesives after 30 years ageing. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 55, n. 2-4, p. 83-90, 1997.

REIS, A. L. C.; JESUS, J. M. H. Resistência ao cisalhamento na linha de cola de três espécies de madeira do norte do estado do Mato Grosso para uso em madeira laminada colada (MLC).

In: Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira, 11., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: IBRAMEM, 2008.

ROSS, R. J. Nondestructive testing and evaluation of wood. In: _____. (Ed.). **Nondestructive Evaluation of Wood**: second edition. 2nd ed. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2015. cap. 1, p. 1-4.

SALES, A.; CANDIAN, M.; CARDIN, V. S. Nondestructive evaluation of timber: the new Brazilian code for the design of timber structures. **Materials and Structures**, v. 43, p. 213-221, 2010.

SCHEIKL, M.; DUNKY, M. Measurement of dynamic and static contact angles on wood for the determination of its surface tension and the penetration of liquids into the wood surface. **Holzforschung – International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood**, v. 52, n. 1-6, p. 89-94, 1998.

SENA-CRUZ, J.; JORGE, M.; BRANCO, J. M.; CUNHA, V. M. C. F. Bond between glulam and NSM CFRP laminates. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 206-269, 2013.

SERRANO, E. Mechanical Performance and Modelling of Glulam. In: THELANDERSSON, S.; LARSEN, H. J. **Timber Engineering**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2003. cap. 5, p. 67-80.

SHI, S. Q.; GARDNER, D. J. Dynamic adhesive wettability of wood. **Wood and Fiber Science**, v. 33, n. 1-4, p. 58-68, 2001.

SHUPE, T. F.; HSE, C. Y.; WANG, W. H. An investigation of selected factors that influence hardwood wettability. **Holzforschung – International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood**, v. 55, n. 5-6, p. 541-548, 2001.

SILVA, M. R.; MACHADO, G. O.; DEINER, J.; CALIL JUNIOR, C. Permeability Measurements of Brazilian Eucalyptus. **Materials Research**, v. 13, n. 3-4, p. 281-286, 2010.

STARK, N. M.; CAI, Z.; CARLL, C. Wood-Based Composite Materials: Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood-Nonwood Composite Materials. In: Forest Products Laboratory. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. cap. 11.

STROBECH, C. Polyurethane adhesives. **International Journal Adhesion and Adhesives**, v. 10, n. 3-4, p. 225-228, 1990.

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

TRAN, V.; OUDJENE, M.; MÉAUSOONE, P. Experimental investigation on full-scale glued oak solid timber beams for structural bearing capacity. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 365-371, 2016.

VICK, C. B. Adhesive Bonding of Wood Materials. In: Forest Products Laboratory. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. cap. 9.

VRAZEL, M.; SELLERS JR., T. The effects of species, adhesive type, and cure temperature on the strength and durability of a structural finger-joint. **Forest Products Journal**, v. 54, n. 3, p. 66-75, 2004.

WANG, J.; BIERNACKI, J. M.; LAM, F. Nondestructive evaluation of veneer quality using acoustic wave measurements. **Wood Science and Technology**, v. 34, n. 6-6, p. 505-516, 2001.

YANG, T.; WANG, S.; LIN, C.; TSAI, M. Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by nondestructive techniques. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 4-12, p. 487-493, 2008.

YOUNGQUIST, J. A.; LAUFENBERG, T. L.; BRYANT, B. S. End jointing of laminated veneer lumber for structural use. **Forest Products Journal**, v. 34, n. 11-12, p. 25-32, 1984.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2003. 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ANEXO

ANEXO A:

PN 02:126.10-001-5 Madeira laminada colada estrutural: métodos de ensaio

A.1 ESCOPO

Esta norma estabelece os métodos de ensaio que se aplicam à madeira laminada colada estrutural para determinar sua conformidade com os requisitos da norma ABNT NBR 7190. Especifica os ensaios de delaminação, cisalhamento nas linhas de cola, tração em emendas dentadas e medição do adesivo espalhado.

A.2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação deste documento. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

PN 02:126.10-001-1, Método de classificação visual da madeira

PN 02:126.10-001-2, Método de caracterização da madeira com corpos de prova isentos de defeitos

PN 02:126.10-001-3, Método de ensaio para caracterização de peças estruturais de madeira

PN 02:126.10-001-4, Método de ensaio de ligações de estruturas de madeira

PN 02:126.10-001-5, Método de ensaio de caracterização de elementos estruturais de madeira laminada colada

ABNT NBR 5628, Componentes construtivos estruturais – Determinação de resistência ao fogo

ABNT NBR 6118, Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento

ABNT NBR 6120, Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – Procedimento

ABNT NBR 6123, Forças devidas ao vento em edificações – Procedimento

ABNT NBR 6627, Pregos comuns e arestas de aço para madeiras – Especificação

ABNT NBR 7187, Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido – Procedimento

ABNT NBR 7188, Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestres – Procedimento

ABNT NBR 7189, Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias – Procedimento

ABNT NBR 7808, Símbolos gráficos para projeto de estruturas – Simbologia

ABNT NBR 8681, Ações e segurança nas estruturas – Procedimento

ABNT NBR 8800, Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (Método dos estados limites) – Procedimento

ABNT NBR 10067, Princípios gerais de representação em desenho técnico – Procedimento

ABNT NBR 15696, Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos

ABNT NBR 16143 Sistema de categorias de uso

ABNT NBR ISO 1096 Madeira compensada – Classificação

ABNT NBR ISO 1098 Compensado laminado para uso geral – Requisitos gerais

ABNT NBR ISO 1954 Madeira compensada - Tolerâncias dimensionais

ABNT NBR ISO 2074 Madeira compensada - Vocabulário

ABNT NBR ISO 2426-1 Madeira compensada – Classificação pela aparência superficial – Parte 1 – Geral

ABNT NBR ISO 2426-2 Madeira compensada – Classificação pela aparência superficial – Parte 2 – Folhosas

ABNT NBR ISO 2426-3 Madeira compensada – Classificação pela aparência superficial – Parte 3 – Coníferas

ABNT NBR ISO 12466-1 Madeira Compensada - Qualidade de Colagem – Métodos de Ensaios

ABNT NBR ISO 12466-2 Madeira Compensada - Qualidade de Colagem – Métodos Requisitos

AITC TEST T110 Cyclic Delamination Test

Eurocode nº 5, Design of timber structures

EN 301 Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures – Classification and performance requirements

EN 385 Finger-jointed structural timber – Performance requirements and minimum production requirements

EN 408 Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties

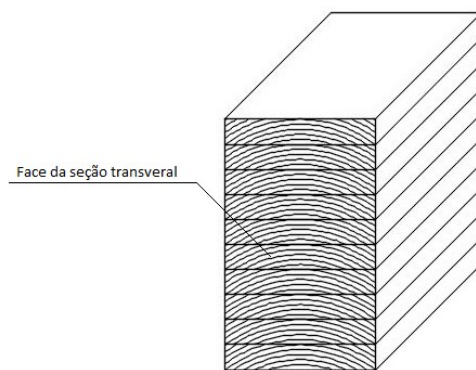
EN 14080 Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Requirements

A.3 CICLO DE DELAMINAÇÃO

A.3.1 Objetivo

Determinação da delaminação das linhas de cola de um lote de madeira laminada colada. As linhas de cola devem ser avaliadas observando-se o desprendimento das lamelas em ambas as faces da seção transversal do corpo de prova da Figura A.1.

Figura A.1 – Representação da face da seção transversal dos corpos de prova



Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

A.3.2 Instrumentação

A.3.2.1 Autoclave, apta para aplicar uma pressão entre 500 kPa e 600 kPa, e um vácuo entre 70 kPa e 85 kPa.

A.3.2.2 Câmara climatizadora, apta para manter:

- uma temperatura entre 65 °C e 75 °C, a uma umidade relativa compreendida entre 8% e 10%;
- uma temperatura entre 25 °C e 30 °C a uma umidade relativa entre 25% e 35%.

A velocidade de circulação do ar em seu interior deve estar compreendida entre 2,0 m/s e 3,0 m/s.

A.3.2.3 Balança, apta para pesar com exatidão de 1 g.

A.3.3 Amostra

A.3.3.1 As amostras devem ser representativas da produção. Elas devem ser extraídas de elementos estruturais já fabricados ou de produtos especialmente fabricados durante o processo produtivo. Devem-se identificar os elementos de madeira laminada colada da qual foram extraídas. A umidade dos elementos estruturais deve estar na faixa de $12\% \pm 2\%$.

A.3.3.2 Cada corpo de prova deve ser extraído da seção transversal completa do elemento estrutural colado e deve-se cortar na forma perpendicular à direção das fibras, assegurando-se um comprimento de $75 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ como indicado na Figura A.2a.

A.3.3.3 Se a largura do elemento estrutural for maior que $300 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, pode-se tomar dois ou mais corpos de prova com uma largura mínima de $150 \pm 5 \text{ mm}$ cada um. Se a altura for maior que $600 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, pode-se tomar dois ou mais corpos de prova com uma altura mínima de $300 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. Nestes casos, quando se preparam dois ou mais corpos de prova de uma seção transversal como consequência da largura e ou altura do elemento estrutural de madeira laminada colada, se considera um único corpo de prova para fins de amostragem.

A.3.4 Procedimento

Para a determinação da delaminação das linhas de cola, as medidas dos comprimentos de cada linha das faces da seção transversal de cada corpo de prova devem ser feitas com exatidão de 0,1 mm.

Contemplam-se dois tipos de procedimentos: o procedimento 1 para adesivos de uso exterior e o procedimento 2 para adesivos de uso interior.

A.3.4.1 Procedimento 1: para adesivos de uso exterior

A.3.4.1.1 A massa de cada corpo de prova deve ser determinada com precisão de 1 g.

A.3.4.1.2 Os corpos de prova devem ser colocados na autoclave e introduzir água a uma temperatura compreendida entre $10 \text{ }^\circ\text{C}$ e $20 \text{ }^\circ\text{C}$ até que os corpos de prova estejam totalmente

submersos. Os corpos de prova devem ser separados de modo que todas as seções transversais estejam livremente expostas à água.

A.3.4.1.3 Um vácuo entre 70 kPa e 85 kPa deve ser aplicado e mantido durante 30 min.

A.3.4.1.4 Uma pressão entre 500 kPa e 600 kPa deve ser aplicada e mantida durante 2 h.

A.3.4.1.5 Secam-se os corpos de prova entre 10 h e 15 h na câmara climatizadora regulada a uma temperatura entre 65 °C e 75 °C, a uma umidade relativa entre 8% e 10% e a uma velocidade do ar circulante entre 2 m/s e 3 m/s. Durante a secagem os corpos de prova devem estar distanciados entre si de 50 mm, como mínimo, e as seções transversais cortadas devem estar posicionadas em forma paralela ao fluxo de ar (ver Figura A.2b).

A.3.4.1.6 A massa de cada corpo de prova deve ser determinada com precisão de 1 g. A secagem na câmara climatizadora deve continuar até que a massa do corpo de prova alcance um valor compreendido entre 100% e 110% da massa inicial do corpo de prova determinado em 3.4.1.1.

A.3.4.1.7 A massa final de cada corpo de prova deve ser registrada com precisão de 1 g e determina-se o comprimento aberto da somatória das linhas de cola das duas faces analisadas como indicado em 3.4.3.

A.3.4.2 Procedimento 2: para adesivos de uso interior

A.3.4.2.1 A massa de cada corpo de prova deve ser determinada com precisão de 1 g.

A.3.4.2.2 Os corpos de prova devem ser colocados na autoclave e introduzir água a uma temperatura compreendida entre 10 °C e 20 °C até que os corpos de prova estejam totalmente submersos. Os corpos de prova devem ser separados de modo que todas as seções transversais estejam livremente expostas à água.

A.3.4.2.3 Um vácuo entre 70 kPa e 85 kPa deve ser aplicado e mantido durante 30 min.

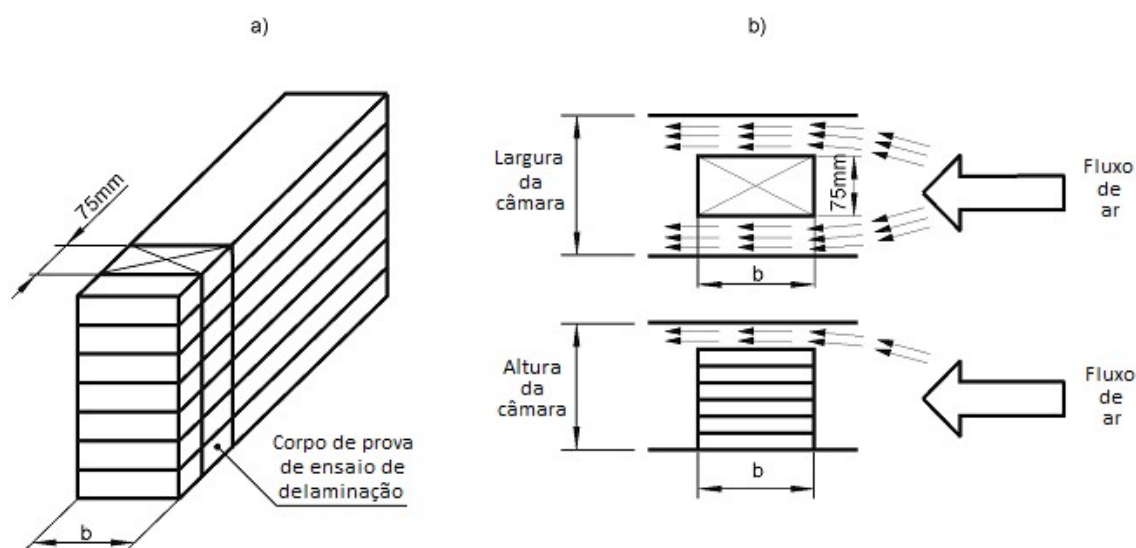
A.3.4.2.4 Uma pressão entre 500 kPa e 600 kPa deve ser aplicada e mantido durante 2 h.

A.3.4.2.5 Este ciclo de vácuo e pressão deve ser repetido, de maneira que no total o processo dos dois ciclos de vácuo e pressão alcancem aproximadamente 5 h.

A.3.4.2.6 Secam-se os corpos de prova durante 90 h na câmara climatizadora regulada a uma temperatura entre 25 °C e 35 °C, a uma umidade relativa entre 25% e 35% e a uma velocidade do ar circulante entre 2 m/s e 3m/s. Durante a secagem os corpos de prova devem estar distanciados entre si a 50 mm, como mínimo, e as seções transversais cortadas devem estar posicionadas em forma paralela ao fluxo do ar (ver Figura A.2b).

A.3.4.2.7 A massa final de cada corpo de prova deve ser registrada com precisão de 1 g e determina-se o comprimento aberto da somatória das linhas de cola das duas faces analisadas como indicado em 3.4.3.

Figura A.2 – a) Corpo de prova para o ensaio de delaminação b) Forma de disposição na câmara climatizadora.



Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

A.3.4.3 Depois de no máximo 1h de finalizado o procedimento de secagem, ao longo das linhas de cola deve ser medido e registrados as juntas delaminadas ou uniões abertas que existem nas duas faces da seção transversal do corpo de prova com uma aproximação de 1 mm.

A.3.5 Cálculos

A.3.5.1 A percentagem de delaminação total (D_t) para cada corpo de prova é calculada mediante a seguinte equação:

$$D_t = \frac{L_a}{L_t} \cdot 100 \quad (\text{A.1})$$

sendo:

D_t é a delaminação total, em percentagem;

L_a é a somatória das larguras das juntas abertas ou delaminadas sobre as faces da seção transversal, em milímetros;

L_t é a somatória das larguras de todas as linhas de cola em ambas as faces da seção transversal, em milímetros.

A.3.5.2 A maior percentagem de delaminação para uma linha de cola é calculada mediante a seguinte equação:

$$D_{t,\text{máx}} = \frac{L_{a,\text{máx}}}{L_j} \cdot 100 \quad (\text{A.2})$$

sendo:

$D_{t,\text{máx}}$ é a maior delaminação para uma linha de cola, em percentagem;

$L_{a,\text{máx}}$ é a maior largura da junta aberta ou delaminada sobre as faces da seção transversal, em milímetros;

L_j é a largura da junta que apresenta maior delaminação em milímetros.

A.3.6 Interpretação dos Resultados

A.3.6.1 Registram-se as áreas com uniões debilitadas ocasionadas pela presença de nós e outras características que possam afetar os resultados. Estas zonas não devem ser incluídas na determinação da delaminação. Não se devem considerar as rupturas produzidas na madeira. Se

devem ignorar delaminações isoladas menores que 2,5 mm de largura e situadas a mais de 5 mm da delaminação mais próxima.

A.3.6.2 Para avaliar a qualidade da colagem no interior do corpo de prova, as uniões podem ser separadas empregando um formão. Uma colagem deficiente ocasionada por falta de pressão ou abertura prematura se caracteriza por uma aparência lustrosa da superfície colada. Esta informação deve ser registrada no relatório.

A.3.6.3 A delaminação máxima permitida após a realização do procedimento está mostrada na Tabela A.1.

A.3.6.4 Se a delaminação total observada após o primeiro ciclo exceder os valores da Tabela A.1 de acordo com o uso e a espécies utilizadas, o ciclo inteiro deve ser repetido com novos corpos de prova. A delaminação observada e registrada no final do segundo ciclo não deve exceder 10% para ambas as espécies.

Tabela A.1 – Limites permitidos de delaminação para cada ambiente de exposição

Ambiente de exposição	Tipo de procedimento	Coníferas	Folhosas
Externo	Externo	4%	6%
Externo protegido	Externo	6%	8%
Interno	Interno	8%	10%

Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

A.3.7 Relatório

Os resultados dos ensaios devem ser apresentados em relatório técnico que deve conter:

- a) a identificação completa do corpo de prova e do elemento de onde se obteve;
- b) a determinação do ensaio realizado e a menção ao número desta norma ABNT;
- c) a espécie de madeira e a classe resistente de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR

7190;

- d) o tipo de adesivo da união;
- e) o procedimento de ensaio aplicado (1 ou 2);
- f) o valor da porcentagem de delaminação total e da maior porcentagem de delaminação;
- g) qualquer observação que o responsável do ensaio considere necessária e qualquer desvio ao procedimento de ensaio;
- h) a assinatura do responsável do ensaio;
- i) a data de ensaio.

A.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NAS LINHAS DE COLA

A.4.1 Objetivo

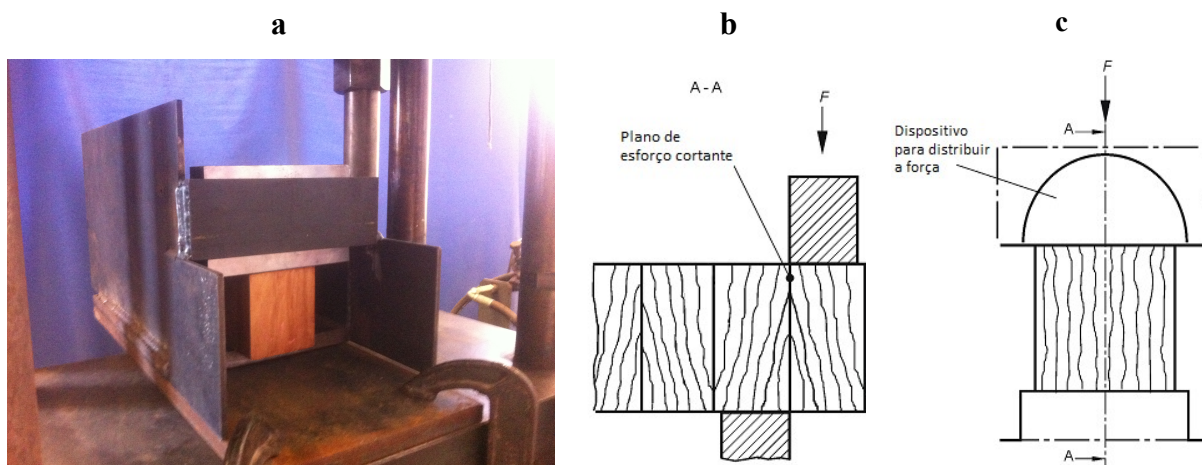
Determinação da resistência ao cisalhamento nas linhas de cola da madeira laminada colada de um lote.

A.4.2 Instrumentação

A.4.2.1 Máquina de ensaio de compressão, apta para medir as forças de ruptura e aplicar a força a uma velocidade constante, de maneira que a ruptura se alcance em um tempo mínimo de 20 s.

O dispositivo para aplicar a força de corte consiste em uma peça que transmite a força ao corpo de prova e deve estar articulada de tal forma que a força atue sobre a superfície transversal do corpo de prova com uma distribuição uniforme de pressão em toda a largura do corpo de prova (Figura A.3a, 3b e 3c).

Figura A.3 – Dispositivo para o ensaio de cisalhamento na linha de cola; a) perspectiva; b) vista lateral; c) vista frontal.



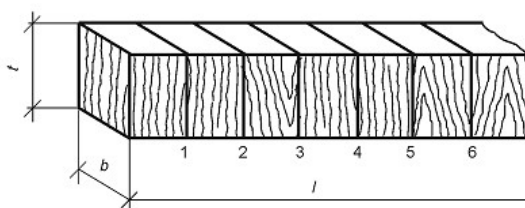
Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

A.4.3 Corpos de prova

A.4.3.1 Cada corpo de prova deve ser marcado de modo que se possa identificar a viga da qual foi retirada a amostra. O corpo de prova retirado deve ser parte da seção transversal do elemento estrutural.

A.4.3.2 Na Figura A.4 apresenta-se o corpo de prova na forma de ensaio. A espessura (t) do corpo de prova deve ser igual 100 mm, a largura (b) e o comprimento (l) dos corpos de prova devem ser o maior possível levando-se em conta que o ensaio deve abranger toda a seção transversal dos elementos colados. Na Tabela A.2 indica-se a quantidade de corpos de prova a extrair em função da largura do elemento colado. Nestes casos, quando se preparam dois ou mais corpos de prova de uma seção transversal, como consequência da largura do elemento estrutural de madeira laminada colada, se considera um único corpo de prova para fins de amostragem.

Figura A.4 – Corpo de prova e área da aplicação da força no ensaio de cisalhamento



Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

Tabela A.2 – Quantidade de corpos de prova a extrair em função da largura do elemento laminado

Largura do elemento laminado (mm)	≤ 100	> 100 e ≤ 160	> 160
Número de corpos de prova	1	2	3

Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

A.4.3.3 As superfícies onde se aplicarão as forças devem estar paralelas entre si e perpendiculares à direção das fibras.

A.4.3.4 O número de linhas de cola a ensaiar em um corpo de prova deve ser como mínimo de 3 da parte superior, 3 da parte central e 3 da parte inferior. Se o número de linhas de cola do corpo de prova for menor que 10 se devem ensaiar todas as linhas de cola.

A.4.4 Procedimento

O plano de cola do corpo de prova deve ser submetido a uma força de cisalhamento, aplicando-se uma força na direção paralela às fibras da madeira, que se incrementa gradualmente, até chegar ao ponto de falha do corpo de prova. A resistência ao cisalhamento na linha de cola e a porcentagem de falha na madeira na área cisalhada deve ser registrada.

A.4.4.1 A altura (t) e a largura (b) da superfície colada que se submeterá ao cisalhamento deve ser medida com exatidão de 0,1 mm. Um mínimo de duas medições deve ser realizadas em cada extremo da superfície para a determinação do valor médio.

A.4.4.2 Os corpos de prova devem ser colocados em uma máquina de ensaio e uma força a uma velocidade constante deve ser aplicada, de maneira que a falha ocorra no mínimo em 20 s.

A.4.4.3 A força máxima ($F_{v0,max}$) a qual produziu a falha deve ser registrada, em newtons.

A.4.4.5 O corpo de prova deve ser retirado da máquina de ensaio e as duas lamelas rompidas devem ser separadas de modo a determinar a porcentagem de ruptura na madeira.

A.4.4.6 Uma lamela rompida da seção transversal que foi submetida ao cisalhamento completo deve ser reservada para determinar o teor de umidade de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 7190.

A.4.5 Cálculo

A.4.5.1 A resistência ao cisalhamento para a linha de cola é calculada com a seguinte equação:

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,\text{máx}}}{b \cdot t} \quad (\text{A.3})$$

Sendo:

f_{v0} é a resistência ao cisalhamento da linha de cola, em megapascals;

$F_{v0,\text{máx}}$ é a força de máxima cisalhante aplicada na lamela, em newtons;

b é a largura do corpo de prova, em milímetros;

t é a altura do corpo de prova, em milímetros.

A.4.6 Interpretação dos Resultados

A.4.6.1 Para estimar a área de ruptura em relação ao total da área submetida ao cisalhamento, as uniões podem ser separadas empregando um formão. A porcentagem de ruptura deve ser determinada em relação a área total da madeira e de acordo com o modo de ruptura.

A.4.7 Relatório

Os resultados dos ensaios devem ser apresentados em relatório técnico que deve conter:

- a) a identificação completa do corpo de prova e do elemento de onde se obteve;
- b) a determinação realizada e a menção a este Método de Ensaio;
- c) a espécie de madeira e a classe resistente de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR

7190;

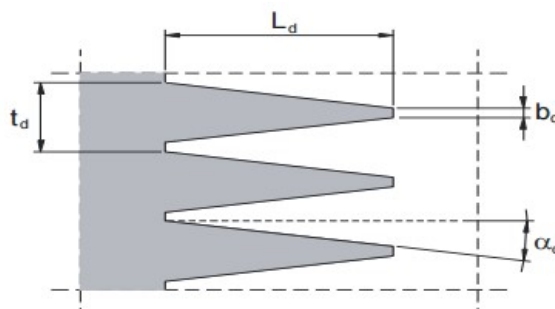
- d) o tipo de adesivo;
- e) a resistência ao cisalhamento e a porcentagem de ruptura na madeira em cada uma das linhas de colagem ensaiadas, e a média de cada corpo de prova;
- f) o conteúdo de umidade de cada um dos corpos de prova;
- g) qualquer observação que o responsável do ensaio considere necessária e qualquer desvio ao procedimento de ensaio;
- h) a assinatura do responsável do ensaio;
- i) a data do ensaio.

A.5 RESISTÊNCIA DE EMENDAS POR UNIÃO DENTADA (*FINGERJOINT*)

A.5.1 Objetivo

Determinação da resistência das emendas por união dentada à tração paralela às fibras de madeira laminada colada. Este item estabelece requisitos mínimos de uniões longitudinais tipo dentadas de lamelas de madeira maciça, de uma mesma espécie, destinado ao uso em elementos estruturais. Este tipo de união longitudinal de lamelas de madeiras maciças, tábuas, são aquelas cujos extremos tem forma de dente, de igual passo e igual perfil, aderidos um ao outro através de colagem e pressão (Figura A.5).

Figura A.5 – Parâmetros geométricos das emendas dentadas



Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

Sendo:

L_d é o comprimento do dente

t_d é o passo do dente

b_d é a largura do dente

α_d é o ângulo de inclinação

A.5.2 REQUISITOS DOS MATERIAIS

A.5.2.1 Madeira

Este procedimento deve ser aplicado a espécies nativas e de reflorestamento.

A.5.2.2 Adesivos

Devem ser utilizados adesivos certificados pelos seguintes órgãos internacionais:

- American Lumber Standard Committee Incorporated (ALSC)
- Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA)
- Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt)
- Materials Testing Institute University of Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA))
- Japan Adhesive Industry Association (JAIA)
- Japanese Industrial Standard Committee (JISC)
- Japanese Agricultural Standard (JAS)

E por Laboratórios Brasileiros competentes, para cada condição climática diferente.

A.5.3 Requisitos de fabricação

Os locais de fabricação devem possuir os requisitos de temperatura e umidade exigidos. Os equipamentos devem ser adequados para cumprirem os requisitos estabelecidos no presente Método de Ensaio.

A temperatura da madeira na zona da união dentada, no momento da montagem, deve ser igual ou maior que 15°C ou igual ao indicado pelo fabricante do adesivo utilizado.

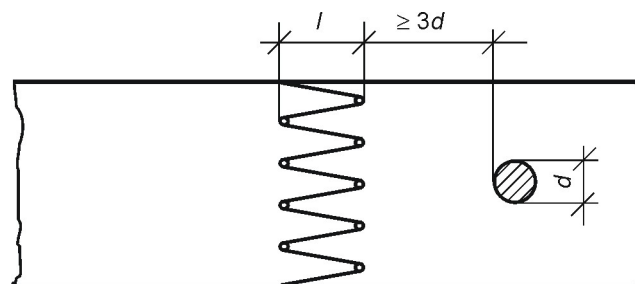
O teor de umidade das lamelas deve respeitar o indicado pelo fabricante do adesivo utilizado. A diferença do teor de umidade entre as lamelas que serão unidas deve ser menor ou igual a 5%.

A.5.3.1 Presença de defeitos na região de união

Os nós de tamanho menor que 6 mm podem ser desprezados. O tamanho dos nós deve ser calculado pela distância entre as tangentes deste (d), que sejam paralelas ao eixo longitudinal da peça (Figura A.6).

A distância entre a união dentada e um nó deve ser igual ou maior que três vezes o tamanho do nó (Figura A.6).

Figura A.6 – Tamanho do nó e a distância entre o nó e a região de união dentada



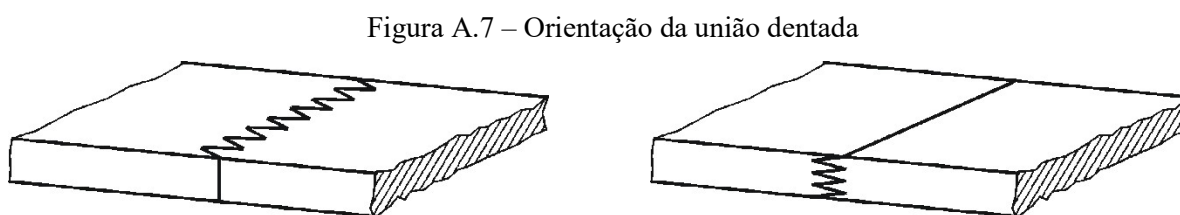
Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

Na zona de união e até 75 mm a partir dela, a falta de borda (esmoado), só é aceitável se ela não se apresentar em mais de duas arestas. Por sua vez, a perda da seção transversal por este motivo não deve ser inferior ou igual a 1% da área da seção transversal.

Não se aceitam fissuras na zona de união, nem desvios acentuados de fibras, nem defeitos que possam afetar a resistência e a correta adesão do material.

A.5.3.2 Orientação da união dentada.

Contemplam-se dois tipos de uniões dentadas: na vertical e na horizontal. No primeiro caso, os dentes são visíveis na face larga das lamelas e no segundo são visíveis na face estreita (Figura A.7).



Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

A.5.4 Perfil do dente

Na ABNT NBR 7190 estão às recomendações, a título de informação, sobre a forma e medidas do perfil.

A.5.5 Ajuste

A usinagem dos dentes deve ser feita com ferramentas e máquinas apropriadas, que possam garantir um perfeito ajuste sem prejuízo a união dentada.

Em todos os casos devem-se manter limpas as superfícies a serem coladas.

Para evitar falsos ajustes devido a um aumento ou diminuição na umidade da madeira, as uniões devem ser feitas o mais rápido possível e sempre dentro de 24 horas após a usinagem.

A.5.6 Aplicação do adesivo

O adesivo deve ser aplicado em ambas às extremidades a serem unidas e em todas as superfícies dos dentes. Um indicador de ter cumprido esta exigência é visualizar o adesivo em todos os quatro lados da união quando a pressão final for aplicada.

A.5.7 Prensagem

Para o processo de colagem da madeira por uniões dentadas é suficiente um período relativamente curto de prensagem. A pressão total deve ser mantida pelo menos 2 segundos.

A pressão apropriada para alcançar uma resistência ótima depende principalmente do perfil do dente, tipo de madeira, teor de umidade e secção transversal. Recomenda-se estabelecer as características da prensagem com base nesses fatores.

A determinação da pressão aplicada deve ser feita por meio da curva da Figura A.9 para evitar rachaduras e fissuras na zona de compressão dos dentes.

A.5.7 Cura do adesivo (endurecimento do adesivo)

Após a prensagem das uniões dentadas, estas devem ser acondicionadas para que ocorra a cura do adesivo, até que a madeira possa ser processada, sem perigo para a estabilidade da emenda dentada.

As lamelas utilizadas em elementos estruturais retos podem ser montadas sem armazenamento intermediário, quando por meio de processos se garanta que as uniões não sofram qualquer ação prejudicial. Caso contrário, deve-se esperar a cura do adesivo.

A.5.8 Resistência à tração paralela às fibras

A resistência à tração paralela às fibras das emendas dentadas de lamelas de MLC ($f_{gt,0}$) é dada convencionalmente pela razão entre a máxima força de tração aplicada a um corpo de prova alongado e a área $A_{gt,0}$ do trecho da emenda.

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,máx}}{A_{gt,0}} \quad (A.4)$$

sendo:

$F_{t0,max}$ é a máxima força de tração paralela às fibras aplicada ao elemento estrutural durante o ensaio, em newtons;

$A_{gt,0}$ é a área inicial da seção transversal tracionada do trecho central do corpo-de-prova da emenda, em metro quadrado;

f_{t0} é a resistência à tração da emenda dentada, megapascals.

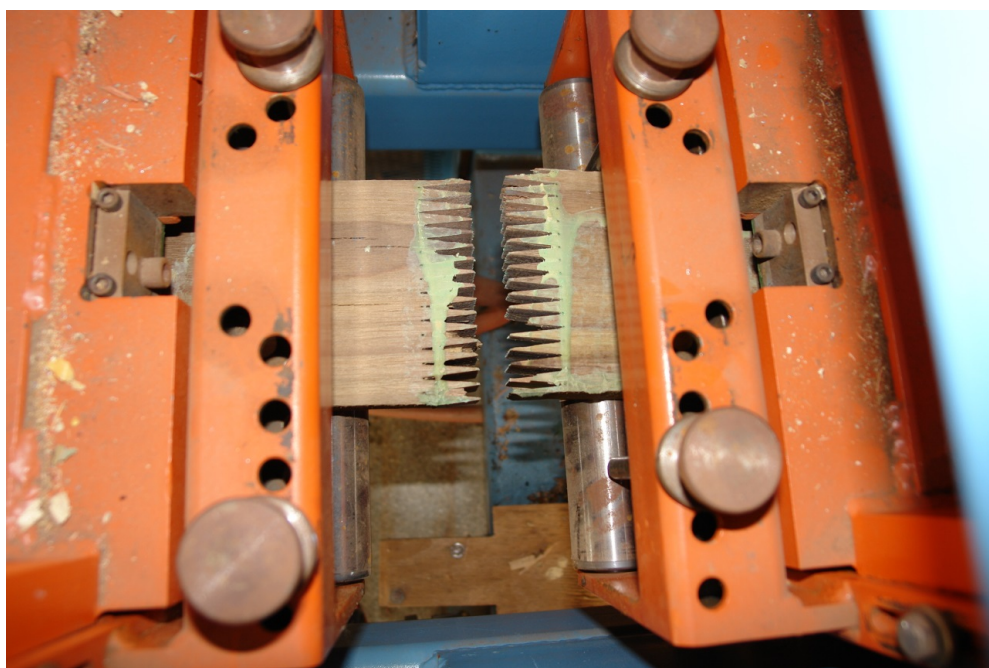
O valor característico da resistência à tração paralela às fibras ($f_{gt,0,k}$) de emendas dentadas deve ser determinado pelo estimador dado pela ABNT NBR 7190.

A.5.9 Amostra

A amostra deve ser representativa das emendas dentadas de madeira laminada colada.

Para se determinar a resistência à tração paralela às fibras das emendas dentadas da madeira laminada colada utilizam-se elementos em dimensões estruturais conforme indicado na Figura A.8.

Figura A.8 – Elementos estruturais para ensaios de resistência à tração paralela às fibras das emendas dentadas



Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

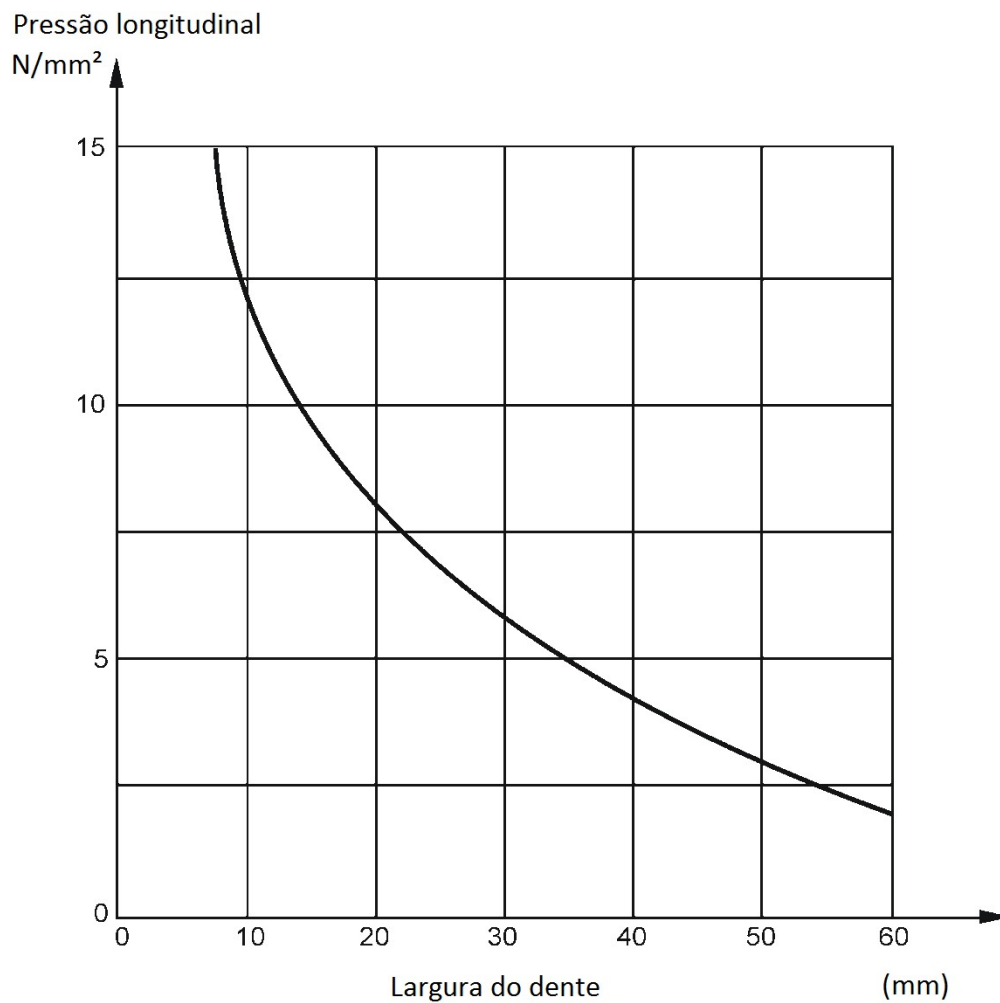
A.5.10 Procedimentos

A.5.10.1 para a determinação da resistência à tração paralela das emendas dentadas, as medidas da seção transversal do trecho central dos corpos de prova devem ser feitas com precisão de 0,1 mm;

A.5.10.2 para o ajuste do corpo de prova na máquina de ensaio devem ser utilizados os acessórios específicos para este tipo de ensaio;

A.5.10.3 o carregamento deve ser monotônico crescente correspondente a uma taxa de 10 MPa por minuto.

Figura A.9 – relação recomendada entre o comprimento do dente e a pressão aplicada.









Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

A.5.11 Relatório

Os resultados dos ensaios devem ser apresentados em relatório técnico que deve conter:

- a) a identificação da amostra: a espécie e a classe de resistência da madeira, o tipo de adesivo e outros componentes utilizados;
- b) a determinação realizada e a citação deste Método de Ensaio;
- c) as medidas transversais das lamelas;
- d) o tratamento aplicado a madeira;
- e) a data de fabricação da união dentada;
- f) a força de ruptura, a resistência a tração, a descrição do modo de ruptura de acordo com a Tabela A.3 com a porcentagem de falha na madeira e si se realizou a determinação da resistência característica das ultimas 15 uniões ($f_{t,15,k}$);

Tabela A.3 – Possíveis modos de ruptura das emendas dentadas

Modo de Ruptura	Descrição da Ruptura	Exemplo
1	Maior parte da ruptura ocorre ao longo da linha de colagem do perfil da união com pouca ruptura na madeira (ruptura na adeira < 70%)	
2	Maior parte da ruptura ocorre ao longo da linha de colagem do perfil da união com boa ruptura de cisalhamento na madeira (ruptura na madeira > 70%)	
3	Maior parte da ruptura ocorre ao longo do perfil da união mas com alguma ruptura na madeira nas raízes dos dentes. Boa ruptura na madeira ao longo das superfícies do perfil da união	
4	Maior parte da ruptura a tração nas raízes dos dentes com alta ruptura na madeira. Pouca ruptura de qualquer tipo ao longo do perfil da união	
5	A ruptura começa na união e se afasta progressivamente para fora da união. Essencialmente 100% ruptura na madeira	
6	A ruptura é fora da união (não influenciada pela união) e 100% de ruptura na madeira	

Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5

A.6 MEDICÃO DO ADESIVO ESPALHADO

A.6.1 Objetivo

Determinar a quantidade de adesivo espalhado em uma lamela para verificar a conformidade com as recomendações do fabricante.

A.6.2 Equipamentos

A.6.2.1 Balança, apta para pesar com exatidão de 1 g.

A.6.3 Materiais

Qualquer papel ou fita de superfície conhecida ou outro material que possa ser colado a velocidades usadas no processo de produção e que tenha uma massa comparável com a da quantidade de adesivo que ficará sobre ele.

A.6.4 Procedimento

A.6.4.1 Mede-se a superfície do papel ou fita com exatidão de 1 mm e determina-se sua massa com precisão de 1 g.

A.6.4.2 Coloca-se o papel ou fita sobre a lamela de madeira.

A.6.4.3 Aplica-se o adesivo em uma lamela de madeira onde se encontra o papel ou fita.

A.6.4.4 Extrai-se o papel ou a fita e se determina a massa deste com o adesivo, com exatidão de 1 g.

A.6.5 Cálculo

A quantidade de mistura do adesivo aplicado deve ser calculada com a seguinte equação:

$$A_d = \frac{m_2 - m_1}{A} \quad (\text{A.5})$$

sendo:

A_d é a quantidade de adesivo esparramado, em gramas por metro quadrado;

m_2 é a massa do papel ou fita com o adesivo, em gramas;

m_1 é a massa do papel ou fita sem o adesivo, em gramas;

A é a área do papel ou fita, em metros quadrados.

A.6.5.1 Este valor deve ser comparado com a quantidade recomendada pelo fabricante do adesivo usado.

A.6.6 Relatório

Os resultados dos ensaios devem ser apresentados em relatório técnico que deve conter:

- a) a determinação realizada e a menção a esta norma ABNT;
- b) a massa e a área do papel ou fita antes da colagem;
- c) a massa depois da colagem;
- d) o adesivo usado e todas as características próprias do processo de espalhamento da mistura: temperatura, dosificação do adesivo, tipo de espalhador, etc.;
- e) o quociente entre a massa do adesivo espalhado do papel ou fita, em gramas por metro quadrado
- f) qualquer observação ou qualquer desvio do procedimento definido;
- g) a data do ensaio.