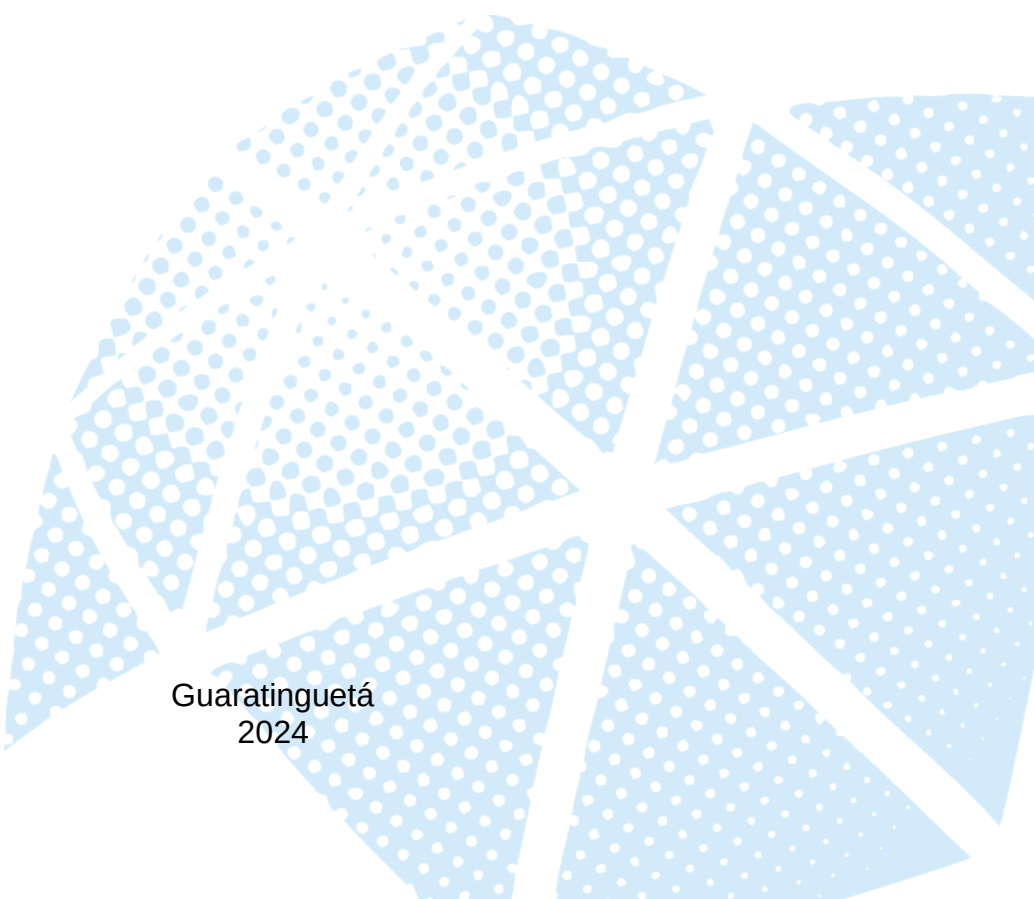


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - FEG

RODRIGO JOSÉ DE QUEIROZ BAZ

**QUALIDADE DE COLAGEM DE ELEMENTOS DE MLC SEGUNDO A ABNT NBR
7190- 6 (2022) CONSIDERANDO DOIS TRATAMENTOS: CCA E
TERMORRETIFICAÇÃO**

Guaratinguetá
2024



RODRIGO JOSÉ DE QUEIROZ BAZ

**QUALIDADE DE COLAGEM DE ELEMENTOS DE MLC SEGUNDO A ABNT NBR
7190- 6 (2022) CONSIDERANDO DOIS TRATAMENTOS: CCA E
TERMORRETIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, para obtenção do título de Grau acadêmico Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina.

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza.

Guaratinguetá
2024

B362q	Baz, Rodrigo José de Queiroz Qualidade de colagem de elementos de MLC segundo a ABNT NBR 7190-6 (2022) considerando dois tratamentos: CCA e termorretificação / Rodrigo José de Queiroz Baz – Guaratinguetá, 2024. 74 f. : il. Bibliografia: f. 72-74 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024. Orientador: Prof. Dr. Julio César Molina Coorientador: Prof. Dr. Alexandre J. Duarte de Souza 1. Termorretificação. 2. Materiais compostos - Delaminação. 3. Resistência ao cisalhamento. I. Título. CDU 674.04(043)
-------	---

Luciana Máximo
Bibliotecária CRB-8/3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A dissertação impacta diretamente na instrução do uso correto das estruturas de madeiras providas de espécie reflorestadas, em específico a espécie *Pinus sp.*, que nos biomas tropicais, devem ser tratadas contra xilófagos para que sua utilização seja eficiente, e ainda contribui para as indústrias do setor planejarem e desenvolverem vigas de MLC com tratamentos preservantes, que atendam as devidas condições técnicas e de durabilidade. Destaca-se também a importância da dissertação para a evolução do setor de construção civil no que se refere a sustentabilidade de materiais utilizados em que considera-se as estruturas de madeira, matéria-prima renovável e o MLC, estrutura de madeira engenheirada com alto valor agregado.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The dissertation directly impacts the instruction on the correct use of wooden structures from reforested species, specifically the *Pinus sp.* species, which in tropical biomes must be treated against xylophages for their use to be efficient, and also contributes to the industrial industries sector to plan and develop glulam beams with preservative treatments, which meet the appropriate technical and durability conditions. The importance of the dissertation for the evolution of the civil construction sector is also highlighted with regard to the sustainability of materials used, which considers wooden structures, a renewable raw material, and MLC, an engineered wooden structure with high value aggregate.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

RODRIGO JOSÉ DE QUEIROZ BAZ

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA
CURSO: MESTRADO**

**APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO**

Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente



JULIO CESAR MOLINA
Data: 06/07/2024 11:49:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA
Universidade de São paulo

Documento assinado digitalmente



DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA
Data: 08/07/2024 10:47:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA
Universidade Federal de Rondônia

Documento assinado digitalmente



MARCIO ROGERIO DA SILVA
Data: 07/07/2024 13:55:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MÁRCIO ROGÉRIO DA SILVA
Universidade Federal do Pará

Guaratinguetá
2024

DADOS CURRICULARES

RODRIGO JOSÉ DE QUEIROZ BAZ

NASCIMENTO	Itapeva / SP
FILIAÇÃO	Eisenhover Anatólio Baz Edna Maria Queiroz Baz
2019	Bacharel em Engenharia Industrial Madeireira Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”
2019	Técnico em Eletrotécnica Escola Técnica Estadual “Demétrio Azevedo Júnior”
2017	Técnico em Química Escola Técnica Estadual “Demétrio Azevedo Júnior”
2002	Técnico em Metalurgia Escola Técnica Estadual “Demétrio Azevedo Júnior”

Dedico este trabalho aos meus pais:

Eisenhover Anat3lio Baz e

Edna Maria Queiroz Baz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço os meus Professores e orientadores da Universidade de São Paulo (USP) e Universidade Estadual Paulista (UNESP), a Cordenação da Pós Graduação da UNESP Guaratinguetá, pelas oportunidades, pelo reconhecimento e pela atenção prestada; aos membros da banca examinadora, da Universidade de Rondônia (UNIR) e da Universidade Federal do Pará (UFPA), à Professora Marilza Rudge e ao Professor Julio Durigan (*in memoriam*) pela credibilidade, confiança e objetividade do sistema de excelência institucional na UNESP, que intruiu minha formação, quando foram Vice-Reitora e Reitor.

Devo também agradecer: ao Professor Ricardo Marques Barreiros, que foi meu orientador no início da graduação, em que aprendi a desenvolver trabalhos e pesquisas que me deram a oportunidade de participar de congressos científicos, e, durante o curso de mestrado, tive a oportunidade de auxiliar alunos da graduação na Faculdade de Ciências Agrárias (FCA) da UNESP, em trabalhos de iniciação científica relacionados ao tema desta dissertação; às equipes de bibliotecas das unidades UNESP: FCA, FEG e ICE.

Destaco agradecimento ao Técnico Juliano Britto (*in memoriam*), que auxiliou e prestou sempre um excelente trabalho nos laboratórios da UNESP de Itapeva, participando da formação e no desenvolvimento de pesquisas para centenas de Estudantes Técnicos, Estudantes de Engenharia, Pós-Graduandos, Professores e Pesquisadores.

Aos professores da Pós Graduação: Eduardo Ciapina, Fernando Marins, Gustavo Ventrone e Cristiane Campos, agradeço pela atenção e compromisso com os objetivos de excelência da UNESP.

Aos membros da equipe de trabalho, profissionais pesquisadores e alunos membros da Pós Graduação em Engenharia de Guaratinguetá: Amauri Ribas, Carolina Oliveira, João Vitor, José Augusto, Karina Oliveira, Kimberly, Murilo, Renan, Sidney, Silas Silva, Tiago Hendrigo, Vitor Galvão, Yuzo Kondo e Waldecir Araújo.

Devo agradecer os trabalhadores do Estado de São Paulo, que por via de impostos financiam as Escolas e Universidades Públicas Paulistas, e, considerando que São Paulo é Estado do Brasil, o agradecimento segue aos trabalhadores de todos os estados, responsáveis e financiadores da formação dos profissionais provindos das entidades de ensino e de formação públicas do Brasil.

Nesta mesma linha de agradecimentos, me sinto bem em destacar que durante a Graduação, em principal no início, a lousa parecia um monte de “rabisco”, até para copiar era difícil, quanto mais entender, e neste contexto, quando criança, a escola “Jeminiano David Muzel” de Itapeva-SP, fez reunião, chamou meus pais e informou que eu apresentava problemas de coordenação e concentração. Então a Professora Cecília se responsabilizou, pediu autorização da escola e meus pais me matricularam direto no primeiro ano, para ser aluno dela, que também garantiu que eu tinha condições e concentração além da média geral, por isso não estava me adaptando nos ciclos da pré escola.

Com o passar dos anos me adaptei ao sistema de ensino das escolas públicas e fui aluno igual grande parte. Na Universidade em um determinado tempo, minhas condições de coordenação e concentração foram questionadas, iguais foram na primeira série, e a conclusão foi: superdotação e habilidades especiais. Comprovando a percepção, a capacidade e a qualidade didática da minha professora do Ciclo Básico.

A vontade de vencer sempre prevaleceu sobre as dificuldades e esta dissertação é uma demonstração do potencial de Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade, que tenho orgulho de sempre ter feito parte efetivamente.

Me recordo de uma apresentação do Congresso de Iniciação Científica (CIC) na Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), em que a pauta inicial dos debates tiveram voz, com as seguintes palavras:

“As agências de fomento acreditam que todos os alunos nasceram gênios? Eles não podem errar e depois acertar? a Universidade é pra isso.” (Indagou um Professor)

“Um aluno que começa errando mas depois acerta é tão bom quanto aquele que começa acertando” (Exclamou um Pesquisador)

Há de se destacar também as amizades, jogos, eventos e confraternizações, em que as melhores lembranças e histórias, fazem da Universidade, há milênios, o ponto máximo do desenvolvimento e evolução da sociedade.

“Aprenda o máximo que você puder com aqueles que sabem mais do que você, que fazem melhor do que você e que veem mais claramente do que você”

EUA Presidente Dwight D. Eisenhower (1890-1969)

RESUMO

Na confecção de Madeira Lamelada Colada, usualmente utiliza-se madeiras reflorestadas, que necessitam de tratamento preservante, contra o ataque de xilófagos (organismos que degradam a madeira, tais como fungos e cupins). O tratamento com substâncias de Cromo, Cobre e Arsênio (CCA), de elevada toxicidade, é o mais utilizado, em contato direto, causa a morte de qualquer organismo vivo e não há na legislação, instruções para o correto descarte. Tais considerações, tornam a termorretificação uma excelente alternativa, porque não há o uso de substâncias tóxicas. As instruções normativas da ABNT NBR 7190-6 (2022), foram utilizadas para avaliar qualidade de colagem e a resistência mecânica de vigas de MLC da espécie *Pinus sp.*, coladas com adesivo KDG 1909. Efetuados ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento das linhas de cola a partir de corpos de prova retirados de vigas de MLC, nas dimensões (5 x 8 x 120) cm. Efetuados ensaios de flexão para a avaliação da resistência e da rigidez das vigas. Comparadas combinações de tratamento/adesivo de madeiras in natura com madeiras tratadas com CCA e termorretificadas a 160° C. Foram obtidas as porcentagens de delaminação: 2,39%, 1,67% e 1,41%, para madeiras in natura, tratadas com CCA e termorretificadas, respectivamente. Foram obtidas as respectivas resistências médias ao cisalhamento das linhas de cola: 7,51MPa, 9,88MPa e 8,49MPa, com ruptura predominante na madeira nas seguintes porcentagens: 91%, 88% e 76%. Nos ensaios de flexão, obteve-se, respectivamente, os valores de MOR (módulo de ruptura) 105 MPa, 104 MPa e 107 MPa, e os valores de MOE (módulo de elasticidade) 16088 MPa, 16037 MPa e 13037 MPa, para as madeiras in natura, tratadas com CCA e termorretificadas, respectivamente. As porcentagens de delaminação permaneceram dentro do limite de 4% estabelecido pela ABNT NBR 7190-6 (2022) com porcentagem de ruptura na madeira superior a 50% indicando a boa eficiência na colagem nas três situações, sendo que as vigas termorretificadas apresentaram menor MOE. As análises estatísticas indicaram que as amostras tratadas tiveram melhores resultados de qualidade de colagem em relação as amostras in natura.

PALAVRAS-CHAVE: Normalização; Termorretificação; Delaminação; Resistência ao Cisalhamento da Linha de Cola.

ABSTRACT

When making Glued Laminated Wood (GLW), reforested wood is usually used, which requires preservative treatment, to increase resistance to attack by xylophages (organisms that degrade wood, such as fungi and termites), which cause loss of resistance. Chemical treatment with highly toxic Chromium, Cuprum and Arsenic (CCA) substances is the most used, in direct contact, it causes the death of any living organism and there are no instructions in the legislation for correct disposal. Such considerations make the thermorectification of wood an excellent alternative, because there are no toxic substances. The normative instructions of ABNT NBR 7190-6 (2022) were used to evaluate the bonding quality and mechanical resistance of glulam beams of the species *pinus sp.*, glued with KDG 1909 adhesive. To evaluate the bonding quality, tests were carried out of delamination and shear resistance of glue lines from test specimens taken from glulam beams produced with pine wood in dimensions (5 x 8 x 120) cm. Flexural tests were also carried out to evaluate the strength and stiffness of the beams. Treatment/adhesive combinations of natural wood were compared with wood treated with CCA and thermorectified at 160° C. As a result, the following delamination percentages were obtained: 2.39%, 1.67% and 1.41%, for natural wood, treated with CCA and heat-treated, respectively. The respective average shear strengths of the glue lines were also obtained: 7.51MPa, 9.88MPa and 8.49MPa, with predominant rupture in the wood in the following percentages: 91%, 88% and 76%. In the flexion tests, the MOR (modulus of rupture) values were obtained, respectively, 105 MPa, 104 MPa and 107 MPa, and the MOE (modulus of elasticity) values were 16088 MPa, 16037 MPa and 13037 MPa, for the natural wood, treated with CCA and heat-treated, respectively. Therefore, the percentages of delamination of the samples were within the limit of 4% established by ABNT NBR 7190-6 (2022) with a percentage of rupture in the wood greater than 50%, indicating good gluing efficiency in the three situations, with the thermorectified beams presented lower MOE, compared to the other combinations. Statistical analyzes indicated that samples treated with CCA and heat-treated had better bonding quality results compared to nature samples.

KEYWORDS: Standardization; Thermorectification; Delamination, Shear Strength of the Glue Line.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura química da celulose, hemicelulose e lignina.....	21
Figura 2 – Floresta plantada x floresta nativa.....	23
Figura 3 – Processo Bethell de tratamento de madeira.....	24
Figura 4 – Aquecimento e resfriamento do tratamento térmico da madeira.....	27
Figura 5 – Etapas processo termorretificação ThermoWood	28
Figura 6 – Etapas 1, 2 e 3 do processo de termorretificação PlatoWood	29
Figura 7 – Etapa 4 do processo de termorretificação PlatoWood	29
Figura 8 – Processo termorretificação OHT.....	30
Figura 9 – Processo termorretificação HolzEteme VAP.....	30
Figura 10 – Viga de MLC.....	31
Figura 11 –Tipos de emenda: (A) de topo; (B) biselada e (C) dentada.....	32
Figura 12 – CP para ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.....	36
Figura 13 – CP para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras	37
Figura 14 – CP para determinação da umidade e densidade aparente da madeira	37
Figura 15 – CP para ensaio de delaminação	40
Figura 16 – CP para ensaio de cisalhamento da linha de cola	41
Figura 17 – (A) Peça e lamelas, (B) lamelas identificadas.....	47
Figura 17.1 – Processo preparação corpos de prova.....	48
Figura 18 – Lamelas condicionadas.	49
Figura 19 – Tratamento preservativo CCA.	50
Figura 20 – Caracterização mecânica dos corpos-de-prova: (A) resistência compressão paralela as fibras; (B) resistência ao cisalhamento paralelo as fibras...	51
Figura 21 – (A) Gabarito confeccionado, (B) posição dos nós, (C) exemplo classe 2.	52
Figura 22 – (A) lamelas identificadas, (B) edição da identificação, (C) viga com lamelas posicionadas.	53
Figura 23 – Colagem das vigas, aplicação do adesivo (A), lamela com adesivo (B)....	53
Figura 24 – Prensagem das vigas, aperto torquímetro (A), Prensagem Vigas (B).....	51
Figura 25 – Esquema dos corpos-de-prova de delaminação e cisalhamento.....	54
Figura 26 – Equipamento para ensaios de delaminação nas linhas de cola.....	55
Figura 27 – Ensaio de delaminação: circuito (A), reservatório (B), câmara (C), grade (D), tampa câmara (E), manômetro (F), secagem amostras (G).	56

Figura 28 – Ensaio Delaminação: anotações de campo (A), medida linha (B).	56
Figura 29 – Dispositivo de aplicação de força de cisalhamento na linha de cola.....	57
Figura 30 – Corpos de Prova Cisalhamento, avaliação dos modos de ruptura na interface adesiva: Termorreificado (A), In Natura (B).....	58
Figura 31 – Detalhe do ensaio de flexão laboratório materiais.	58
Figura 32 – Gráfico delaminação nas linhas de cola.	63
Figura 33 – Gráfico resistência ao cisalhamento nas linhas de cola.....	65
Figura 34 – Percentuais de quebra das linhas de cola na região de madeira.....	66
Figura 35 – Corpos de prova ensaios de flexão rompidos.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de pesquisas relacionadas publicadas por palavra chave. ...	44
Tabela 2 – Caracterização da Madeira das vigas In Natura [U = 12%].	60
Tabela 3 – Caracterização da Madeira das vigas Termorretificadas [U = 12%].	61
Tabela 4 – Caracterização da Madeira das vigas tratadas com CCA [U = 12%]	62
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de delaminação nas linhas de cola das vigas. ...	63
Tabela 6 – Valores de resistência ao cisalhamento nas linhas de cola.	65
Tabela 7 – Resultados percentual quebra madeira x adesivo	63
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de resistência à flexão das vigas	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Substâncias químicas adesivo (A), substâncias químicas CCA (B)..... 67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVOS	20
2.1	GERAL.....	20
2.2	ESPECÍFICOS.....	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	MADEIRA	21
3.2	MADEIRA DE REFLORESTAMENTO	22
3.3	TRATAMENTO QUÍMICO PRESERVANTE - CCA	23
3.4	TRATAMENTO TÉRMICO PRESERVANTE - TERMORRETIFICAÇÃO	24
3.4.1	Métodos de Termorretificação	27
3.5	MADEIRA LAMELADA COLADA – MLC	31
3.6	RESINAS POLIURETANAS.....	32
3.7	FATORES QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DE COLAGEM DE MLC..	33
3.8	CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA.....	33
3.9	CLASSIFICAÇÃO VISUAL.....	34
3.10	CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA	35
3.11	ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA.....	35
3.12	ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELO ÀS FIBRAS	36
3.13	ENSAIO DE CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS	37
3.14	UMIDADE E DENSIDADE APARENTE	37
3.15	ENSAIO DE DELAMINAÇÃO	39
3.16	ENSAIO DE CISALHAMENTO NAS LINHAS DE COLA.....	41
3.17	ESTUDOS SOBRE MLC NO BRASIL.....	42
3.18	ESTUDOS SOBRE MLC NO EXTERIOR	43
3.19	CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	44
3.20	CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	45
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
4.1	CONFECCÃO DAS LAMELAS E CPS PARA CARACTERIZAÇÃO	47
4.2	ARMAZENAMENTO E CONTROLE DE UMIDADE DAS LAMELAS	49
4.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	50
4.4	CLASSIFICAÇÃO VISUAL.....	51
4.5	CONFECCÃO DAS VIGAS DE MLC	52

4.6	ENSAIO DE DELAMINAÇÃO NAS LINHAS DE COLA.....	54
4.7	ENSAIO DE CISALHAMENTO DAS LINHAS DE COLA.....	57
4.8	ENSAIO DE FLEXÃO DAS VIGAS	58
4.9	ANÁLISE ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS.....	59
4.10	CUSTOS DE PRODUÇÃO	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
5.1	RESULTADOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	61
5.2	RESULTADOS ENSAIOS DE DELAMINAÇÃO.....	63
5.3	RESULTADOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NAS LINHAS DE COLA.....	64
5.4	RESULTADOS PERCENTUAIS DE QUEBRA NAS REGIÕES DE MADEIRA X ADESIVO NAS LINHAS DE COLA	66
5.5	RESISTÊNCIA À FLEXÃO	68
6	CONCLUSÃO.....	70
7	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

Produtos engenheirados de madeira estão se tornando cada vez mais necessários na indústria, tais como a madeira lamelada colada, cuja sigla é MLC (sigla em inglês Glulam), que é um elemento estrutural fabricado através da colagem de lamelas de madeira. A MLC tem como vantagens: redução de defeitos em relação a peças maciças, seu formato pode se adequar conforme o projeto, utilizando-se de prensas que também fazem a conformação da viga.

No Brasil não havia normas específicas para o processo de produção e controle de qualidade de vigas de MLC, e utilizava-se normas estrangeiras para essa finalidade, em especial a norma Eurocode 5 e a norma europeia EN 14080 (2013), que deu origem a norma brasileira ABNT NBR 7190-6 (2022), específica para a avaliação da qualidade de colagem de MLC.

Espécies de madeiras exóticas (não nativas) provenientes de reflorestamento, tais como pinus sp, necessitam de tratamentos preservantes, para evitar a degradação causada por organismos xilófagos e fungos, que formam colônias e tem sua dieta base em hemicelulose/celulose e extrativos da madeira, provocando a diminuição ou perda da resistência mecânica da estrutura.

Dentre os tratamentos atuais, destaca-se como mais comuns e eficientes os tratamentos químicos com substâncias de Cromo, Cobre e Arsênio, que são de elevada toxicidade, em contato direto causa a morte de plantas e animais, deve-se considerar também que não há na legislação ou em normativas técnicas o descarte adequado de madeiras tratadas com CCA.

A Termorreificação (Tratamento Térmico) da madeira não utiliza produtos tóxicos, tendo o calor, como principal insumo no processo de produção, em que este melhora a estabilidade dimensional, eleva a resistência ao ataque de organismos xilófagos e altera a coloração da madeira, melhorando o aspecto visual.

A termorreificação da madeira vem sendo utilizada por empresas brasileiras para aumentar a resistência aos organismos xilófagos e elevar o valor agregado da madeira. Assim, torna-se importante, dentro do contexto dos produtos industrializados de madeira, como a MLC, o estudo da qualidade de colagem de madeiras tratadas, não somente da espécie in natura.

Os testes de qualidade de colagem envolvem ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento das linhas de cola.

A ABNT NBR 7190-6 (2022) que tem como base a norma europeia EN 14080 (2013) para ambientes externos propõe tais ensaios.

No Brasil os ensaios de qualidade de colagem com base na NBR 7190-6 (2022) estão em fase de desenvolvimento e estudos são necessários para avaliar a qualidade de resposta do referido procedimento.

Poucos estudos foram desenvolvidos no Brasil envolvendo madeiras tratadas com CCA em comparação às madeiras in natura, no que se refere a avaliação da qualidade de colagem através de ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento das linhas de cola.

Por outro lado, existem vários métodos de termorretificação das madeiras e o mais comum no Brasil é aquele feito por aquecimento em estufa. Também não existem trabalhos envolvendo a qualidade de colagem de madeiras termorretificadas e nem a comparação de madeiras termorretificadas comparadas com madeiras tratadas com CCA e madeiras in natura.

Portanto, os resultados obtidos a partir desta pesquisa poderão servir de base para outros estudos que vierem a ser realizados nessa temática e que envolvam outras espécies de madeira de reflorestamento como também outros tipos de adesivos estruturais ou tipo de termo retificação para as madeiras.

O processo de termorretificação envolve baixas temperaturas, ou seja, temperaturas de até 200° C dependendo do tipo de madeira. No processo de termorretificação ocorre alteração de propriedades físicas e mecânicas da madeira com o aumento da temperatura, e aumenta a resistência da madeira ao ataque de cupins. Existem vários resultados na literatura de madeiras termorretificadas até 200 °C.

Vale mencionar ainda que estudos envolvendo madeiras em altas temperaturas (até 1260 °C) tem sido desenvolvido no Brasil, e estes estudos tem como foco o tempo de incêndio que determinado elemento estrutural resiste sob carregamento.

Estudos experimentais dessa natureza são mais difíceis de serem realizados devido a necessidade de equipamento e, portanto, são escassos resultados para madeiras em altas temperaturas. A maioria dos estudos, neste caso, tem cunho numérico.

Este projeto de pesquisa tem como objetivo geral: avaliar a qualidade da colagem de elementos de MLC, envolvendo madeiras de reflorestamento do tipo conífera (*pinus sp.*), in natura, tratadas com CCA e termorretificadas, coladas com

adesivo poliuretano KDG 1909, além de, avaliar estatisticamente a resistência e a rigidez de elementos de MLC in natura, tratados com CCA e termorretificados.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar a qualidade da colagem de elementos de MLC produzidos com madeiras de pinus ssp, tratadas com CCA, termorretificadas e in natura (sem tratamento), coladas com adesivo poliuretano KDG 1909, e, avaliar a resistência e a rigidez de elementos de MLC na flexão.

2.2 ESPECÍFICOS

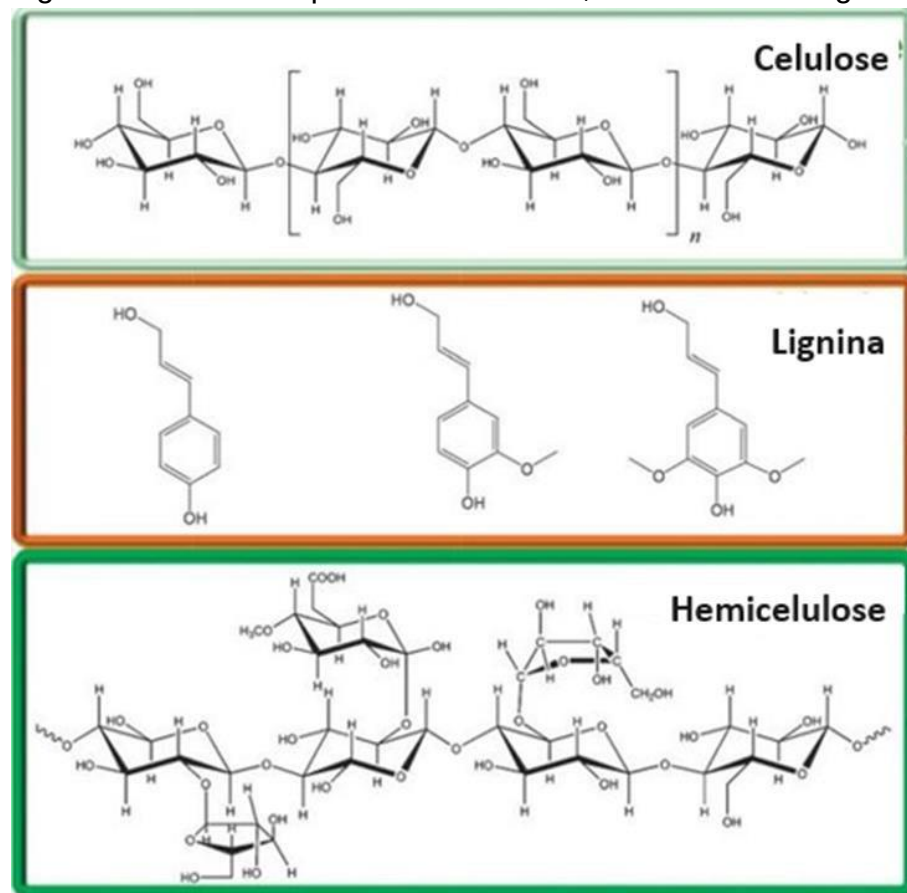
- Avaliar a normalização existente sobre o assunto para levantamento dos métodos de ensaios a serem utilizados na avaliação da qualidade de colagem de elementos de MLC e de produtos colados de madeira;
- Determinar com ensaios de caracterização, as propriedades de resistência e de rigidez das lamelas de madeiras in natura, em relação a madeira tratada com CCA e termorretificadas a 160 °C.
- Avaliar a qualidade de colagem das vigas de madeira in natura, em relação as vigas de madeira termorretificada e vigas de madeira tratada com CCA, através de ensaios de cisalhamento das linhas de cola e de delaminação segundo a ABNT NBR 7190-6:2022 para ambientes externos;
- Avaliar a resistência e a rigidez de vigas de MLC fabricadas com madeiras in natura, com CCA e termorretificadas através de ensaios de flexão de três pontos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MADEIRA

A madeira é um material de composição orgânica, formado basicamente de estruturas físico-químicas denominadas, celulose, hemicelulose, lignina que têm função estrutural e extrativos, que tem função de defesa botânica. A Figura 1 mostra a estrutura da madeira em detalhes.

Figura 1 – Estrutura química da celulose, hemicelulose e lignina..



Fonte: Adaptado de Alonso *et al.* (2013).

As propriedades mecânicas da madeira podem ser melhoradas através do processo de laminação. Exemplos de produtos estruturais laminados da madeira são os painéis CLT (*Cross-laminated timber*), a madeira lamelada colada (MLC) e o LVL (*Laminated Veneer Lumber*), amplamente aplicados nas estruturas de madeira e edificações da construção civil.

Além disso, os laminados vêm sendo aplicados com eficiência na indústria moveleira. (DERIKVAND e PANGH, 2016).

3.2 MADEIRA DE REFLORESTAMENTO

Segundo Zenid *et al.* (2009), a utilização de florestas naturais ou plantadas sob Projeto de Manejo Florestal aprovado pelo IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis) caracteriza o emprego correto desses recursos naturais, uma vez que faz uso do princípio de sustentabilidade. Prevê o uso de recursos florestais de modo que possibilite a recomposição da floresta, renovando o ecossistema e tornando a extração viável econômica, social e ambientalmente.

De acordo com o relatório do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017) para a Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura, no ano de 2017, o Brasil teve uma área total de florestas plantadas de 9,8 milhões de hectares, sendo 75,2% desse total (7,4 milhões de ha) de Eucalipto, 20,6% (2 milhões de ha) de Pinus e 4,2% (400 mil ha) de outros gêneros. Cerca de 70,5% das florestas plantadas do Brasil no período se concentravam nas Regiões Sul e Sudeste do país.

O gênero eucalipto caracteriza-se como um grupo variado de espécies cujas densidades podem variar de 500 a 1000 kg/m³ e apresentam boa resistência mecânica, alta durabilidade natural e baixa tendência à rachaduras (ZENID *et al.*, 2009).

A madeira de Pinus, por ser um gênero de reflorestamento, apresenta propriedades mecânicas significativamente influenciadas pelos procedimentos de manejo florestal empregado no seu plantio, clima e composição do solo, o que faz com que sejam necessários cuidados ao se utilizar o gênero para fins estruturais (ZENID *et al.*, 2009).

A possibilidade de extração sem dificuldades legislativas de madeiras reflorestadas, diferente das leis ambientais que preservam as espécies de madeiras nativas, que tem a extração proibida ou permitida com condições de manejo sustentável, fazendo com que o valor de custo e venda seja elevado, impedindo de utilizá-las em larga escala, justifica para o uso da MLC madeiras exóticas, em especial, eucaliptos sp. e pinus sp. (MIOTTO, 2009). A Figura 2 mostra os detalhes de floresta plantada e de madeira nativa.

Figura 2 – Floresta plantada x floresta nativa.



Fonte: Portal Celulose (2022).

3.3 TRATAMENTO QUÍMICO PRESERVANTE - CCA

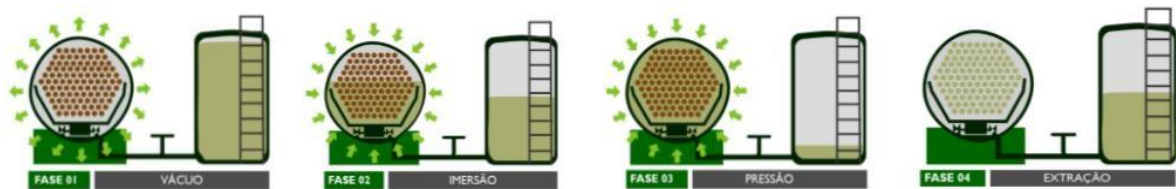
Segundo Zenid *et al.* (2009), a utilização de florestas naturais ou plantadas sob Projeto de Manejo Florestal aprovado pelo IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Dentre as substâncias empregadas para a prevenção de deterioração biológica da madeira, podem ser citados o creosoto (preservante de caráter oleoso) e o CCA (*Chromated Cooper Arsenate - Arseniato de Cobre Cromatado*) e o CCB (*Copper Chrome Borate - Boro de Cobre Cromatado*), sendo os dois últimos hidrossolúveis (CAVALHEIRO, 2014).

O CCA é composto por sais de cobre, cromo e arsênio, em que o elemento cromo (Cr) age como fixador, o arsênio (As) como inseticida e o cobre (Cu) como fungicida. Além disso, os produtos formados quando o CCA reage com a madeira, tornando-a menos hidrofóbica, fato que eleva a eficiência ao tratamento (LEPAGE *et al.*, 1986 apud AZAMBUJA, 2002).

De acordo com Lepage *et al.* (1986) e Azambuja (2002), o tratamento de célula cheia em auto clave, chamado de “Processo Bethell”, consiste na introdução da madeira seca e beneficiada na autoclave e então é aplicado um vácuo inicial, responsável pela remoção do ar da madeira, em seguida, sob a pressão negativa exercida no do vácuo, a solução de CCA é transferida para o interior da autoclave, penetrando nos poros da madeira por capilaridade, até a saturação que ocorre na

estabilização da pressão na câmara, em seguida a pressão é aliviada e o excesso de CCA é transferido de volta para o reservatório e um vácuo final é aplicado para retirar o excesso de produto da superfície da madeira (Figura 3).

Figura 3 – Processo Bethell de tratamento de madeira.



Fonte: Adaptado de Portal Celulose (2024).

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que é o principal órgão e a principal referência do Estado de São Paulo – Brasil, para ensaios e identificação das características físicas, químicas e biológicas de espécies de madeira, classifica a madeira de *Pinus sp.* como uma espécie suscetível ao ataque por fungos (emboloradores, manchadores e apodrecedores), cupins, brocas e perfuradores marinhos. No entanto, é considerada uma madeira fácil de tratar devido sua baixa densidade e por consequência alta porosidade (ZENID *et al.*, 2009).

3.4 TRATAMENTO TÉRMICO PRESERVANTE - TERMORRETIFICAÇÃO

A termorretificação da madeira ou também denominado tratamento térmico, consiste em expor a madeira ao calor em atmosfera controlada, com gases inertes, vapor d'água ou baixa quantidade de oxigênio, para evitar a combustão. O efeito do processo térmico é a degradação, portanto o efeito pode ser chamado de termodegradação da estrutura química da madeira (MODES, 2017).

A termorretificação protege a madeira contra o ataque de organismos xilófagos, porque a estrutura química da madeira, principalmente a hemicelulose e a lignina sofrem degradação, alterando a composição de seus elementos, fazendo com que os ataques de xilófagos diminuam e/ou sejam evitados. A efetividade do tratamento térmico depende dos seguintes fatores: propriedades físicas da espécie de madeira (teor de umidade, densidade), e em relação ao processo do tratamento, as principais

variáveis são: taxa de aquecimento, temperatura de aquecimento, tempo de processo e a atmosfera (WINDEISEN, STROBEL E WEGENER, 2007).

Dentre as vantagens do tratamento térmico, destaca-se que não há utilização de produtos tóxicos, o processo faz com que a madeira adquira uma coloração específica, que valoriza o produto tanto no aspecto visual, quanto ao aspecto estrutural, melhora a estabilidade dimensional e a desvantagem é que diminui a resistência mecânica (SUNDQVIST, 2004; CALONEGO, 2009; MOURA *et al.*, 2012; SILVA, 2012).

A termorretificação é um processo de tratamento térmico utilizado na madeira para aumentar a sua durabilidade. Ele consiste na ação do calor sobre a madeira causando alterações em sua estrutura interna a partir do princípio de termodegradação de seus constituintes na presença controlada de oxigênio ou ar, ou na ausência de oxigênio (BORGES e QUIRINO, 2004).

Segundo Brito (1992) e Borges e Quirino (2004) as temperaturas usadas na termorretificação da madeira estão abaixo de 280 °C, pois a partir desse ponto se inicia a combustão espontânea da madeira.

O tratamento térmico não envolve a utilização de compostos químicos, ao contrário de outros tratamentos preservantes, que utilizam dentre outras substâncias o arseniato de cobre cromatado (CCA), borato de cobre cromatado (CCB) e o creosoto. A utilização desses produtos químicos apresentam como principais problemas a toxicidade e o descarte inadequado da madeira e dos resíduos tratados, causando grande impacto ambiental. Apesar disso, para fins estruturais o tratamento químico ainda é amplamente utilizado.

Dentre as vantagens do tratamento térmico na madeira também se destacam a melhora na estabilidade dimensional, a maior resistência a fungos, a mudança de coloração agregando maior valor ao produto e o baixo custo do processo se comparado aos que utilizam produtos químicos.

No processo de termorretificação vários fatores devem ser observados para um melhor aproveitamento do potencial mecânico da madeira, tais como tempo, temperatura, umidade, velocidade de aquecimento, pressão a espécie da madeira. Nesse sentido, estudos estão sendo feitos (Silva e Molina, 2012).

Segundo Molina (2017), estudos relacionados a mudança de cor na madeira em função da temperatura têm sido realizados na tentativa de agregar maior valor comercial a madeira. A termorretificação (ou retificação térmica) é uma alternativa

para modificar a aparência de madeiras de menor valor econômico. A madeira termorretificada adquire colorações semelhantes às aquelas tropicais de maior valor econômico, além de apresentar melhoria na estabilidade dimensional e resistência aos xilófagos. De uma maneira geral as coníferas apresentam coloração mais clara que as folhosas para as mesmas condições de exposição às altas temperaturas.

Estudos relacionados à termorretificação da madeira envolvem temperaturas de aquecimento entre 150°C e 250°C com uso de gás nitrogênio em atmosfera inerte (SILVA, 2012).

Além disso, similarmente ao que acontece na avaliação da carbonização da madeira em fornos, no caso da termorretificação, também são utilizadas curvas de aquecimento associadas a uma determinada taxa de aquecimento, incluindo trecho da curva referente ao resfriamento.

Para exemplificar, uma dessas curvas é a utilizada por Silva (2012), com uma taxa de aquecimento de 0,033 °C.min⁻¹⁰, na qual a rampa de aquecimento é definida entre t_0 e t_1 de acordo com a Equação (1). Nesse gráfico a temperatura ambiente é tomada pode ser tomada com um valor igual a 20 °C.

$$t = \frac{(T/t_a)}{60} \quad (1)$$

Onde:

T = temperatura (°C);

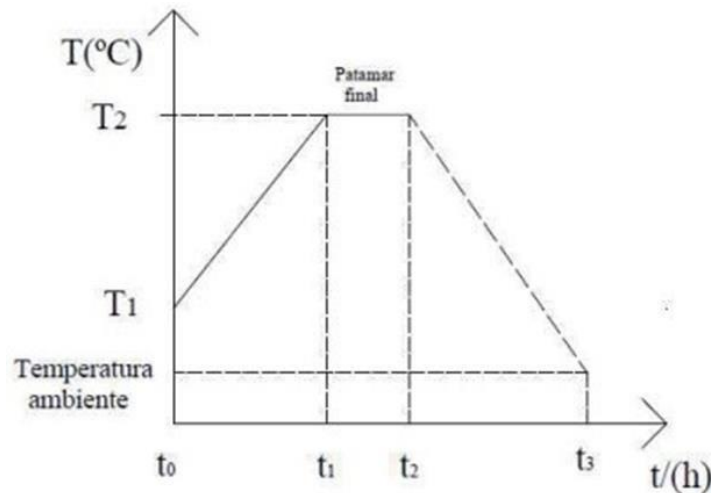
t = tempo (h);

t_a = taxa de aquecimento (°C.min⁻¹)

O tempo em que as amostras permanecem na estufa após atingirem a temperatura final da rampa de aquecimento é chamada de patamar final, definido de t_1 a t_2 , como uma variação de mais ou menos 2 °C.min⁻¹. O término do processo de tratamento térmico, entre t_2 e t_3 , pode ser feito apenas com o sistema de circulação de ar ligado até que a temperatura interior da estufa atinja o valor de 20 °C (Figura 4). O tratamento térmico causa alterações na estrutura molecular da madeira. A hemicelulose é o primeiro componente químico a ser atingido pelo calor, seguido da celulose e por último a lignina. Isso ocorre devido as suas diferentes estruturas moleculares. O teor de extrativos também sofre variações devido às mudanças

químicas. As mudanças de coloração atribuída às madeiras tratadas termicamente estão relacionadas à degradação da hemicelulose e às mudanças no teor de extrativos.

Figura 4 – Aquecimento e resfriamento do tratamento térmico da madeira.



Fonte: Adaptado de Silva (2012).

As mudanças químicas ocasionadas pelo tratamento térmico também influenciam nas propriedades físicas e mecânicas.

De maneira geral, a madeira apresenta perda de resistência. O módulo de elasticidade é menos afetado pelo tratamento térmico e, em alguns casos, ocorre ganho desta propriedade.

3.4.1 Métodos de Termorretificação

Segundo Oliveira (2020) vários métodos de termorretificação podem ser usados para o tratamento térmico da madeira, dentre eles podem ser citados o Thermowood, o PlatoWood, o Perdure, Rectification, o Oil Heat Treatment, o OHT, o VAP e o HolzSysteme.

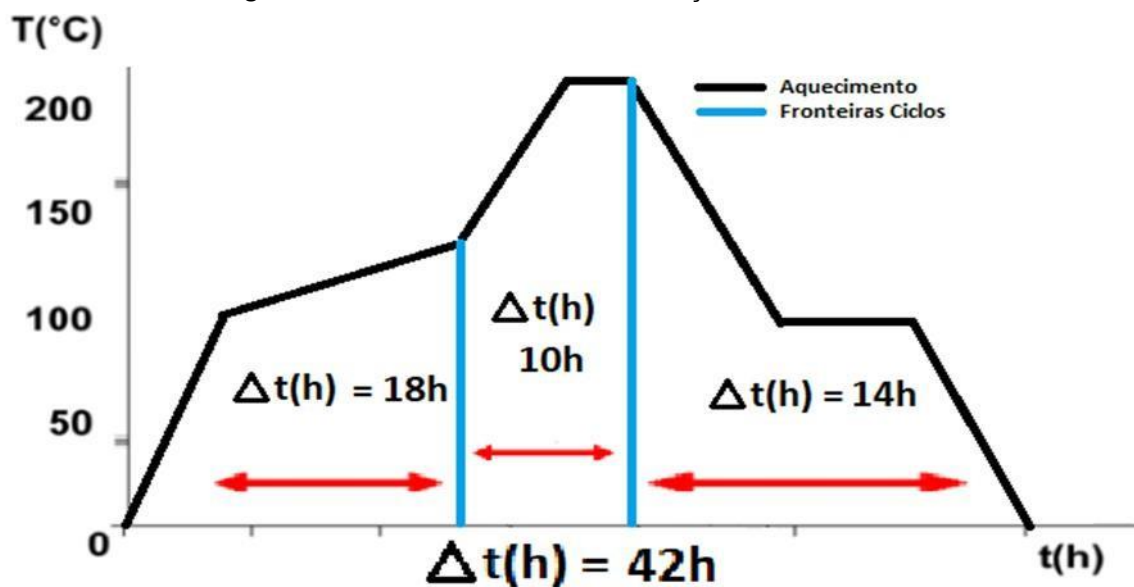
ThermoWood: Este processo foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisa Técnica da Finlândia, em finlandês “Valtion Tekninen Tutkimuskeskus”, o processo é dividido em três etapas conforme International Thermowood Association (2003).

1ª - A madeira é aquecida, e controla-se o teor de umidade em balança analítica até atingir 0%, adiciona-se vapor aquecido até a atmosfera atingir 100°C, após a estabilização eleva-se a temperatura em gradiente até 130°C;

2ª – A temperatura é elevada e mantida em valores entre 185 e 215°C, neste patamar deve permanecer entre 2 e 3 horas;

3ª – A temperatura é resfriada até atingir 80-90°C e injeta-se vapor até a madeira que está sendo tratada, atingir o teor de umidade de 4 -7%

Figura 5 – Processo termorretificação thermowood.



Fonte: Adaptado de International Thermowood Association (2003).

PlatoWood (Figuras 6 e 7): Este processo foi desenvolvido pela companhia holandesa *Planto International BV*, e consiste em quatro etapas:

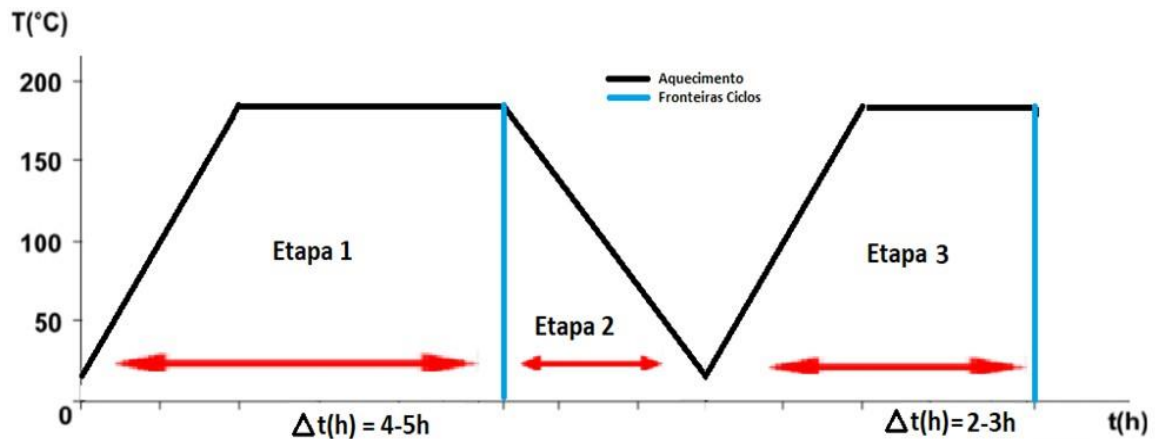
1ª – Umidade inicial da espécie de madeira deve estar entre 14% e 20%, eleva-se a temperatura para 160-190°C, mantendo neste patamar durante 4-5 horas, em atmosfera úmida com pressão aproximada de 7 atm. Nesta etapa ocorre a reação chamada hidrotermólise, que provoca a degradação das hemiceluloses e lignina, gerando ácidos orgânicos;

2ª – A madeira é submetida a secagem convencional, até atingir 10% de umidade;

3ª – A madeira é aquecida novamente até temperatura de 170-190°C durante 2-3 horas, a umidade final da madeira nesta etapa vai próxima a 0%.

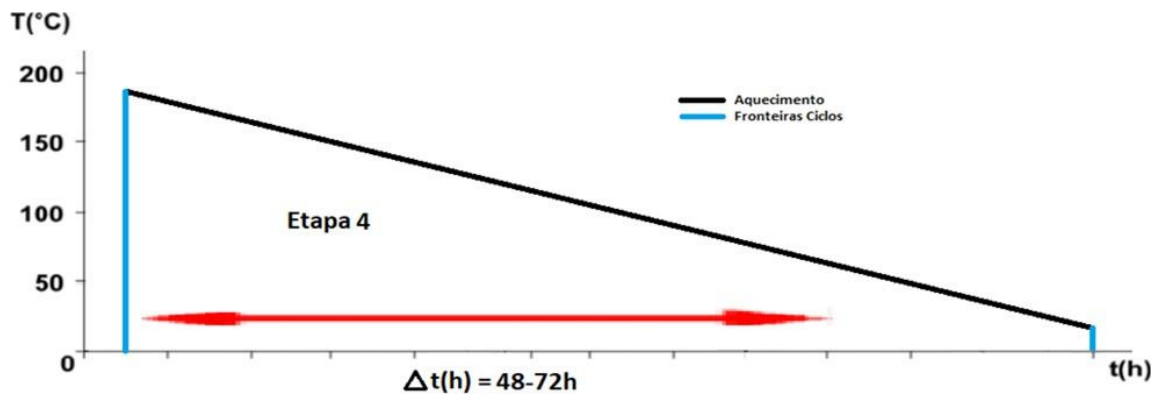
4ª – Injeta-se vapor ou ar aquecido na atmosfera durante 2-3 dias até atingir umidade 4-6%.

Figura 6 – Etapas 1, 2 e 3 do processo de termorreificação PlatoWood.



Fonte: Adaptado de International Thermowood Association (2003).

Figura 7 – Etapa 4 do processo de termorreificação PlatoWood.



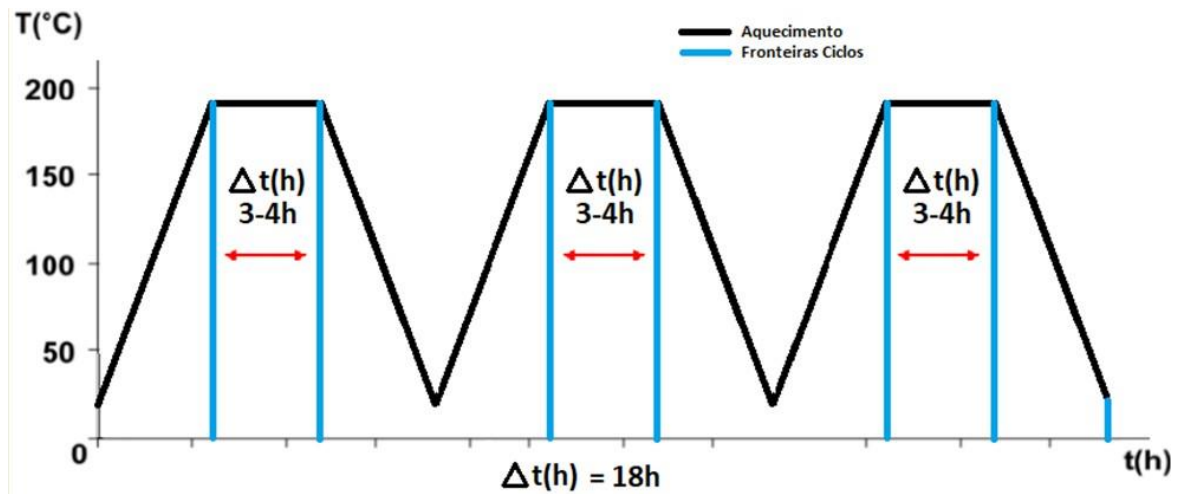
Fonte: Adaptado de International Thermowood Association (2003).

Oil Heat Treatment (OHT): Este processo consiste na imersão da madeira em óleo, usualmente de soja ou girassol com atmosfera controlada, com baixo índice de oxigênio para evitar combustão, o processo é dividido em três etapas:

1ª - A madeira é imersa em um tanque com óleo e atmosfera inerte, eleva-se a temperatura até 180-220°C durante 2-4h;

2ª e 3ª etapas – Idem a etapa 1ª.

Figura 8 – Processo termorretificação OHT.



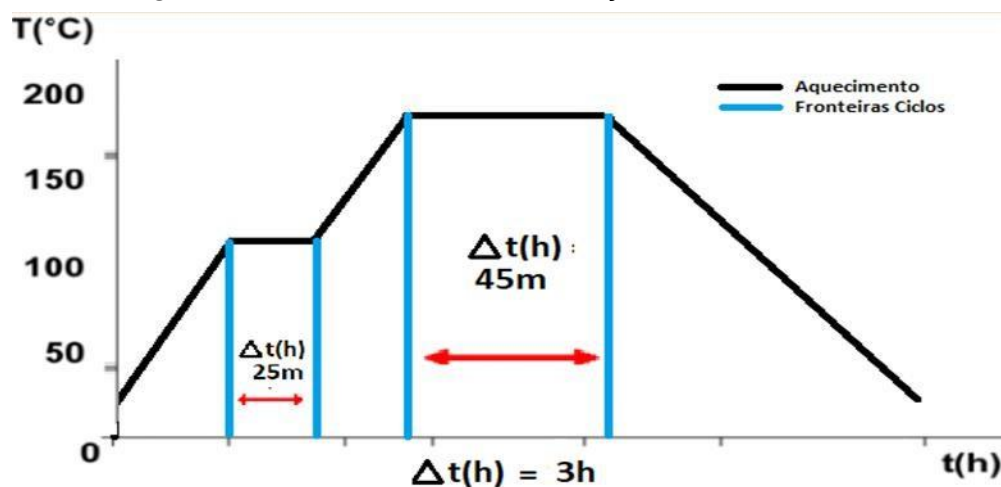
Fonte: Adaptado de International Thermowood Association (2003).

VAP HolzSteme (Figura 9): este processo de termorretificação, consiste na aplicação de calor e vapor saturado na madeira a ser tratada em atmosfera isenta de oxigênio e divide-se nas seguintes etapas:

1ª – Insere-se calor no sistema até atingir a temperatura 110°C em que a madeira é mantida durante 25 minutos.

2ª – Insere-se calor no sistema até atingir a temperaturas entre 160-180 em que a madeira é mantida durante 45 minutos e depois resfriada normalmente até atingir a temperatura ambiente.

Figura 9 – Processo termorretificação HolzEteme VAP.



Fonte: Adaptado de International Thermowood Association (2003).

3.5 MADEIRA LAMELADA COLADA – MLC

A MLC é um produto industrializado da madeira utilizado na construção civil, em especial para a produção de vigas, arcos e pórticos, considerado como sendo um dos mais antigos produtos que consistem na colagem de lâminas. Assim, a MLC ainda não é o produto principal nas edificações brasileiras, uma vez que não existe grande cultura de emprego da madeira no país, além do custo elevado de resinas adesivas e do pequeno número de indústrias brasileiras relacionadas à sua fabricação.

As vigas de MLC apresentam vantagens em comparação à madeira serrada no sentido da possibilidade de reproduzir as mais diferentes formas e dimensões, além do significativo aumento de resistência e rigidez (MIOTTO, 2009).

A MLC consiste na união de duas ou mais lamelas cujas direções das fibras estejam posicionadas de forma paralela ao comprimento do elemento estrutural fabricado, união essa realizada a partir de um adesivo. A Figura 10 apresenta o aspecto de uma viga de MLC.

Figura 10 – Viga de MLC



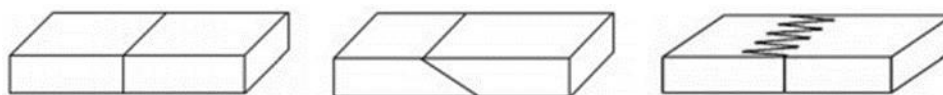
Fonte: Carpinteria (2021).

A espessura máxima das lamelas não deve exceder 50 mm, exigência que permite a fabricação de peças de formas e dimensões variáveis e versáteis às condições do projeto (MIOTTO, 2009).

No caso de elementos estruturais, se faz necessária a adoção de emendas entre as lamelas ao longo da viga (Figura 11). Existem as emendas de topo (cuja execução é fácil, mas de baixa eficiência), as biseladas (apresenta custo superior à emenda de topo pela perda de madeira e dificuldade de execução) e as dentadas ou finger-joints,

de resistência mais uniforme que as outras emendas e de alta eficiência para produção de MLC (AZAMBUJA e DIAS, 2002).

Figura 11 –Tipos de emenda: (A) de topo; (B) biselada e (C) dentada.



Fonte: Azambuja e Dias (2002).

As principais vantagens da MLC consistem na possibilidade de alcançar uma grande variedade de formas e dimensões, e apresenta alta resistência mecânica e peso próprio relativamente baixo. Inclusive, permite a redução dos defeitos (normalmente encontrados na madeira maciça de grandes dimensões) e a utilização de peças de qualidade inferior em zonas de menor solicitação mecânica, possibilitando a combinação de diferentes espécies. Por fim, a MLC apresenta elevada resistência ao fogo e agentes corrosivos em função de suas grandes seções transversais (ZANGIÁCOMO, 2003; SEGUNDINHO *et al.*, 2013).

Zangiácomo (2003) apresenta como desvantagens da MLC o seu maior custo quando comparado à madeira maciça, além de exigir técnicas, equipamentos e mão-de-obra adequada para sua fabricação.

3.6 RESINAS POLIURETANAS

Azambuja e Dias (2002) avaliaram o adesivo poliuretano bi-componente à base de óleo de mamona baseado no poliól 25040 e pré-polímero A249, em CPs de madeira de reflorestamento com e sem tratamento preservante com CCA, identificando parâmetros adequados de colagem em madeira. Os autores obtiveram resultados que indicaram que o adesivo apresentou bom desempenho em vigas estruturais de MLC. O estudo também demonstrou que, na época, o adesivo poliuretano apresentou custo inferior aos adesivos à base de resorcinol-formaldeído, além de apresentar a vantagem de que o adesivo poliuretano é biodegradável e não é agressivo ao organismo humano.

Segundinho *et al.* (2018) estudou o efeito da utilização da resina poliuretana à base de mamona em madeira tratada com preservante CCA e verificou que a

presença dos sais da madeira preservada afetou de forma negativa a resistência ao cisalhamento na linha de cola, apresentando resultados inferiores ao recomendado para fins estruturais.

3.7 FATORES QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DE COLAGEM DE MLC

Alguns fatores podem influenciar de forma significativa a resistência mecânica das vigas de MLC, são eles: espécie da madeira empregada, espessura e posicionamento das lamelas, adesivo e tratamentos escolhidos, entre outros (CALIL, 2010 *apud* CALIL NETO *et al.*, 2014).

Vale ressaltar que afinidade da interação entre os elementos de produção de MLC podem ocasionar significativas diferenças no desempenho de suas estruturas. O tratamento preservante com CCA pode prejudicar a eficiência de colagem, uma vez que os materiais metálicos insolúveis presentes no CCA precipitam na parede celular da madeira, comprometendo a relação madeira-resina, minimizando a durabilidade da união na superfície dos materiais (ZHANG e KAMDEM, 2000; CALIL NETO *et al.*, 2014).

3.8 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Segundo o projeto de norma ABNT NBR 7190-2 (2022), referente as madeiras de reflorestamento, a atribuição de classes de resistência à peças de madeira requer classificações visual e mecânica, além da mensuração da densidade do material.

A avaliação das propriedades físicas e mecânicas permite o emprego mais adequado da madeira (DIAS e LAHR, 2002). A norma brasileira vigente para madeiras nativas, ABNT NBR 7190-3 (2022), propõe três tipos de caracterização das propriedades da madeira para uso estrutural, à umidade padrão de 12%.

Para espécies não conhecidas, é recomendada a caracterização completa a partir da investigação das propriedades: resistências à compressão paralela e normal

às fibras; resistências à tração paralela e normal às fibras; resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; resistências ao embutimento paralelo e normal às fibras e as densidades básica e aparente.

No caso das espécies pouco conhecidas, adotar a caracterização mínima, obtida pela avaliação das propriedades: resistências à compressão, tração e cisalhamento paralelos às fibras e as densidades básica e aparente.

Para espécies usuais, a atual norma brasileira recomenda a resistência à compressão paralela às fibras como base de referência para estimativa de parte das outras propriedades com auxílio de equações pré-estabelecidas.

Além das propriedades citadas, a ABNT NBR 7190-3, propõe procedimentos de ensaio para obtenção das propriedades de módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras; módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática e tenacidade. A ABNT NBR 7190-4 propõe o ensaio de peças com dimensões estruturais

Devido à necessidade de laboratórios adequados e máquinas específicas (cujo porte é grande e de custo elevado) para boa parte de tais ensaios, a madeira é normalmente empregada sem a devida investigação de suas propriedades, fator que leva ao mau uso e desperdício do material (DIAS e LAHR, 2002).

3.9 CLASSIFICAÇÃO VISUAL

O procedimento de classificação visual envolve a inspeção das faces de cada uma das lamelas empregadas na produção de MLC (são desconsiderados os defeitos que ocorrem exclusivamente em topos e bordas das peças), permitindo a qualificação e quantificação dos defeitos existentes ao longo do comprimento da peça. Baseada em tal avaliação, é atribuída uma determinada classe visual (1, 2 ou 3) para cada lamela, conforme o projeto de norma PN-02-126 10-001-1. As lamelas classificadas como classe 1 são de melhor qualidade e aquelas classificadas como classe 3 são as de qualidade inferior.

O projeto de norma apresenta recomendações de classificação visual para madeiras de folhosas e coníferas.

Os defeitos considerados pelo citado projeto de norma para classificação visual de peças de madeira são: presença de medula, nós, inclinação excessiva das fibras, fissuras passantes e não passantes, encurvamento, arqueamento, encanoamento, torcimento, ataques biológicos, presença de madeira de reação, danos mecânicos ou bolsas de resina.

3.10 CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA

A classificação mecânica da madeira é realizada através de ensaios destrutivos e não destrutivos para a determinação de suas propriedades de resistência e elasticidade.

Para a determinação das propriedades mecânicas podem ser utilizados os documentos ABNT NBR 7190-3:2022 e ABNT NBR 7190-4:2022 a depender do tipo de madeira.

3.11 ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA

O módulo de elasticidade das lamelas pode ser obtido através da flexão estática, executado em máquinas universais de ensaios. Neste tipo de ensaio, uma carga (dentro do trecho linear da curva tensão x deformação) é pré-estabelecida e o valor do módulo de elasticidade pode ser obtido a partir da Equação (2):

$$E_M = \frac{L^3 \times (F_{0,6\%} - F_{0,3\%})}{48 \times I \times (\delta_{0,6\%} - \delta_{0,3\%})} \quad (2)$$

Onde:

$F_{0,6\%}$: força exercida no meio do vão com flecha igual a 0,6% do vão livre [N];

$F_{0,3\%}$: força exercida no meio do vão com flecha igual a 0,3% do vão livre [N];

L : distância entre apoios considerada para o ensaio [mm];

$\delta_{0,6\%}$: flecha no meio do vão devido a aplicação de $F_{0,6\%}$ [mm];

$\delta_{0,3\%}$: flecha no meio do vão devido a aplicação de $F_{0,3\%}$ [mm]; I :

momento de inércia da viga [mm⁴].

A resistência à flexão (f_M) é obtida pela Equação (3).

$$f_M = \frac{M}{W} \quad (3)$$

Onde:

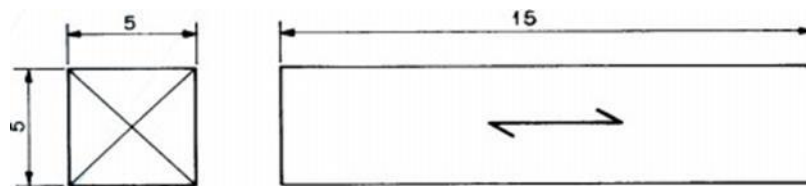
M : momento fletor máximo para o corpo de prova no ensaio [N.mm];

W : módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo de prova [mm³].

3.12 ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELO ÀS FIBRAS

A ABNT NBR 7190-3:2022 propõe como CP para ensaio de compressão paralela às fibras o modelo representado pela Figura 12, com dimensões em centímetros.

Figura 12 – CP para ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190-3 (2022).

A resistência à compressão paralela às fibras da madeira é calculada a partir da Equação (4):

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (4)$$

Onde:

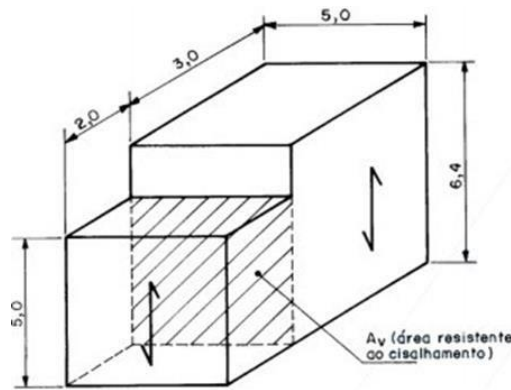
$F_{c0,max}$ = força de compressão máxima aplicada ao CP [N];

A = área inicial da seção transversal que sofre compressão [mm²].

3.13 ENSAIO DE CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS

A ABNT 7190-3:2022 propõe como CP para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras o esquema representado pela Figura 13, com dimensões em centímetros.

Figura 13 – CP para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190-3 (2022).

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira é calculada a partir da Equação 5:

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A_{v0}} \quad (5)$$

Onde:

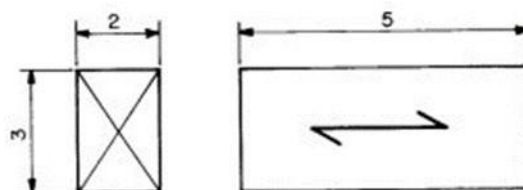
$F_{v0,max}$ = força cisalhante máxima aplicada ao CP [N];

A_{v0} = área inicial da seção crítica do CP no plano paralelo às fibras [mm²]

3.14 UMIDADE E DENSIDADE APARENTE

As amostras de umidade, bem como aquelas utilizadas para determinação da densidade aparente, recomendadas pela ABNT NBR 7190-3:2022 possuem as dimensões apresentadas pela Figura 14.

Figura 14 – CP para determinação da umidade e densidade aparente da madeira.



Fonte: ABNT NBR 7190-3 (2022).

A Equação (6) é utilizada para cálculo da umidade a partir de massa inicial e massa seca de CP conhecidos.

$$U = \frac{m_i - m_s}{m_s} * 100 \quad (6)$$

Onde:

m_i = massa inicial da madeira [g];

m_s = massa da madeira seca [g].

Normalmente, a fase de secagem das lamelas ocorre de modo artificial, com auxílio de estufas de secagem. A secagem ocorre até que seja obtido o teor de umidade desejado para a lamela. Segundo Cerchiari (2013), para a colagem adequada na produção de MLC, a umidade das lamelas não deve ser superior a 15%.

Os CP indicados pela ABNT NBR 7190-3 (2022) para determinação da densidade aparente apresentam as mesmas dimensões que os recomendados para determinação da umidade.

A densidade aparente depende do teor de umidade da madeira, fato que torna inútil citar a densidade de uma madeira sem que seja especificado o respectivo teor de umidade (LOGSDON, 1998).

Logsdon (1998) apresentou um critério de correção da densidade aparente para o teor de umidade de 12%, valor padrão sugerido pela ABNT NBR 7190-6 (2022), a partir das equações abaixo:

$$\Delta V = \frac{V_{U\%} - V_{seca}}{V_{seca}} * 100 \quad (7)$$

$$\rho_{12\%} = \rho_{U\%} + \rho_{U\%} * [(1 - \delta v) * \frac{(12 - u\%)}{100}] \quad (8)$$

$$\delta v = \frac{\Delta V}{U\%} \quad (9)$$

Onde:

$\rho_{12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade [g/cm³];

$\rho_{U\%}$ = densidade aparente a U% de umidade [g/cm³];

U% = teor de umidade [%];

δv = coeficiente de retratibilidade volumétrica [adimensional];

ΔV = retração volumétrica da variação de umidade entre U% e 0% [%];

$V_{U\%}$ = volume da amostra a U% de umidade [cm^3];

V_{seca} = volume da amostra seca [cm^3].

A densidade da madeira é de grande importância para garantia da eficiência de estruturas em MLC, de forma que devem ser empregadas espécies de madeira com densidade dentro do intervalo de $0,40 \text{ g/cm}^3$ a $0,75 \text{ g/cm}^3$. Quanto maior a densidade maior a dificuldade de colagem das madeiras.

As espécies mais indicadas, nesse sentido, para a fabricação de MLC são as do gênero *Pinus sp.*, cuja densidade gira em torno de $0,5 \text{ g/cm}^3$ (FIORELLI, 2005).

3.15 ENSAIO DE DELAMINAÇÃO

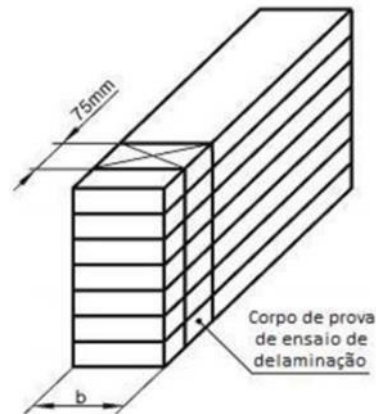
Para a determinação da delaminação em ambientes externos, o método de ensaio ABNT NBR 7190-6 (2022) determina que os CPs (Figura 6) devem ser pesados para determinação da massa inicial. Em seguida, os CPs (Figura 15) devem ser inseridos na autoclave e submersos em água a uma temperatura de 10°C a 20°C e então é aplicado um vácuo de 70 kPa a 85 kPa ao longo de 30 minutos.

Na sequência, os CPs permanecem submersos por um período de 2 horas a uma pressão no intervalo de 500 kPa a 600 kPa.

Ao término do ciclo de vácuo-pressão, os CPs são secos na câmara climatizadora, onde permanecem até que a massa do corpo de prova atinja um valor compreendido entre 100% e 110% da massa inicial. A temperatura deve estar entre 65°C e 75°C . No interior da estufa, o fluxo de ar deve estar entre 2 e 3 m/s e a umidade relativa do ar por volta de 8% a 10%.

A análise da abertura linha de cola é geralmente realizada através da medida das linhas de cola das face frontal e posterior do CP retiradas das vigas de MLC, desconsiderando as delaminações das linhas de cola na parte lateral da viga. Dessa forma, a somatória das aberturas da linha de cola a serem consideradas para cálculo do percentual de delaminação relacionado à somatória das linhas de cola (comprimento total) medidos antes dos ensaios de vácuo e pressão na autoclave.

Figura 15 – CP para ensaio de delaminação.



Fonte: ABNT NBR 7190-6 (2022).

O percentual de delaminação total para amostras é calculado a partir da Equação (10).

$$Dt = \frac{La}{Lt} * 100 \quad (10)$$

Onde:

Dt = delaminação total [%];

La = somatório do comprimento da abertura de todas as linhas de cola das faces da seção transversal [mm];

Lt = comprimento total de todas as linhas de colas das faces da seção transversal [mm].

Nogueira (2017), em seu estudo, afirma que os procedimentos do projeto de norma brasileiro geraram bons resultados e se apresentou mais prático do que o método canadense em função do menor tempo necessário para execução do ensaio como um todo, apresentando uma diferença total no tempo de 11 dias entre os dois tipos de procedimento.

Esse procedimento é baseado no método B do ensaio de delaminação da EN 14080 (2013). Este ensaio de delaminação é utilizado o procedimento para adesivos usados em ambientes externos.

A porcentagem de delaminação máxima permitida na amostra após a realização do ensaio é de apenas 4% para o caso de madeiras de coníferas. Para madeiras do tipo folhosas a delaminação máxima permitida é de 6%.

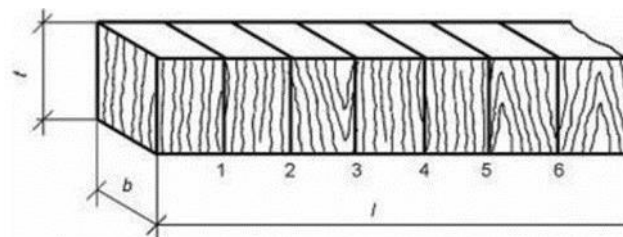
3.16 ENSAIO DE CISALHAMENTO NAS LINHAS DE COLA

As superfícies de cola dos CPs (Figura 16) sofrem a aplicação de forças de cisalhamento na direção paralela às fibras da madeira, forças essas aumentadas gradualmente até a ocorrência da falha.

De acordo com o método de ensaio ABNT NBR 7190-6:2022, para determinação das resistências ao cisalhamento das linhas de cola, são medidas as alturas (t) e as larguras (b), conforme a Figura 16, das áreas coladas a serem submetidas ao cisalhamento direto. Considera-se nos ensaios um mínimo de duas medições nos extremos das superfícies, sendo que os CPs são pesados para obtenção das respectivas massas.

Os CP's são posicionados no dispositivo metálico e estes sofrem a aplicação das cargas à velocidade de ensaio constante, de forma que a falha na linha de cola seja ocasionada.

Figura 16 – CP para ensaio de cisalhamento da linha de cola.



Fonte: ABNT NBR 7190-6 (2022).

O percentual de delaminação total para amostras é calculado a partir da Equação (11).

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{b \times t} \quad (11)$$

Onde:

f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira [MPa];

$F_{v0,max}$ = força cisalhante máxima aplicada ao CP [N];

b = largura do CP [mm];

t = altura do CP [mm].

Nogueira (2017) afirma que a densidade da madeira empregada deve ser semelhante para todas as lamelas das vigas para permitir uma melhor uniformidade

nos resultados de resistência ao cisalhamento na linha de cola. Inclusive, região central das vigas é o local onde ocorrem as maiores tensões de cisalhamento, de modo que a verificação de sua resistência é essencial.

3.17 ESTUDOS SOBRE MLC NO BRASIL

Fiorelli (2005) estudou critérios para a fabricação de vigas de MLC com e sem reforço de fibras de vidro. Além disso, propôs um modelo numérico para cálculo do momento fletor resistente e da rigidez à flexão e de vigas de MLC sem reforço e reforçadas com PRF (Polímero Reforçados com Fibras). Por fim, o trabalho avaliou a eficiência de adesivos Phenol-resorcinol e Epóxi AR-300, submetendo as vigas à variação de temperatura, umidade e pressão. Os resultados indicaram a validade do modelo proposto e a eficiência dos adesivos. Inclusive, o emprego de PRF se apresentou significativo no aumento de resistência e rigidez da estrutura.

Calil Neto (2011) estudou os ensaios de controle de qualidade de elementos estruturais de MLC, com base nas normas canadense CSA 0177-2006, estadunidense AITC A 190.1-2007, europeia EN 386-2001 e chilena NCh2148.cR2010 e propôs recomendações procedimentais para o sistema de controle de qualidade dos materiais utilizados na produção de MLC. Foram utilizadas três combinações espécie-adesivo-tratamento. Os resultados apresentaram que as melhores combinações foram aquelas que empregaram a madeira de pinus com qualquer tipo de adesivo ou tratamento adotado, podendo, inclusive, ser adotada para meios externos. A metodologia proposta pelo autor se demonstrou satisfatória para classificação de classe de utilização para as combinações espécie-adesivo-tratamento preservante.

Nogueira (2017) avaliou a adequação de métodos de ensaio propostos pelos projetos de norma ABNT NBR 7190-3 e ABNT NBR 7190-6:2022, para subsidiar o controle de qualidade na indústria através do estudo das propriedades de elementos estruturais de MLC. Para tal, o autor utilizou uma série de vigas de MLC de diferentes combinações espécie-adesivo, realizando ensaios de cisalhamento na linha de cola, delaminação e compressão paralela às fibras, além do ensaio de tração paralela às fibras para avaliação da resistência das emendas dentadas. A partir do estudo, o ensaio de delaminação para adesivos sujeitos a ambientes externos foi considerado

eficaz e prático. Para os testes de cisalhamento, o autor propõe uma redução no número de análises, desde que a região central seja priorizada, uma vez que esta possui maior concentração de tensões de cisalhamento. O autor afirma que a madeira de eucalipto apresenta maior dificuldade de colagem em função de sua alta densidade, levando à uma alta frequência de ruptura na linha de cola, em especial, das emendas dentadas, e obteve um percentual elevado para delaminação da espécie.

Serrano (2013), realizou ensaios de cisalhamento da linha de cola em corpos de prova, com configuração proposta pela ABNT NBR 7190, para avaliação da interação entre madeiras de *Eucalyptus grandis* e os adesivos Cascophen e Jowapur.

Utilizou na colagem entre as peças de madeira uma gramatura de 300 g/m² com aplicação do adesivo nas duas faces opostas das peças de madeira. Também considerou diferentes pressões de colagem (0,8 MPa, 1,2 MPa e 1,5 MPa), além de três diferentes tipos de acabamentos para a superfície das lamelas, os quais foram obtidos por fresamento periférico discordante. A autora observou que a eficiência adesiva não variou significativamente entre os adesivos, pressão de colagem e acabamento de superfície.

Segundinho *et al.* (2018) realizaram ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento da linha de cola em elementos de MLC confeccionados com três tipos de madeiras (*Tectona grandis*, *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus sp*), sem tratamento preservante, coladas com adesivo bicomponente à base de melanina-ureia-formaldeído (MUF 1242/2542). O adesivo foi utilizado na proporção 100 partes/peso do adesivo e 20 partes/peso do endurecedor a partir de uma gramatura de adesivo de 250 g/m² aplicada nas duas faces das lamelas. Os ensaios de delaminação foram realizados com base nas recomendações da AITC T110 (2007) e os ensaios de cisalhamento das linhas de cola foram realizados a partir de corpos de prova de cisalhamento com corte duplo.

3.18 ESTUDOS SOBRE MLC NO EXTERIOR

A quantidade de extrativos existentes nas faces da madeira perturba a adesão e provoca alterações nas forças coesivas dos adesivos. Consequentemente, a quantidade de extrativos provoca também uma diminuição na resistência ao

cisalhamento da linha de cola, dependendo da quantidade de extrativos presentes na madeira.

Tanto a madeira úmida quanto a madeira seca, são problemáticas para a colagem. As faixas de umidade de melhor adesão na madeira estão entre 6% e 14%, sendo que os adesivos mais tradicionais necessitam de umidades entre 12% e 14%.

Elementos de MLC confeccionados com lamelas de madeiras de *Fagus sylvatica* L. com 38 mm de espessura e colados com o adesivo melanina-ureia-formaldeído apresentaram maior porcentagem de delaminação que elementos de MLC produzidos com lamelas de espessuras de 29 mm e 35 mm.

3.19 QUANTIDADE DE TRABALHOS EM RELAÇÃO AS PALAVARS CHAVES

De acordo com a plataforma scopus, até a data de defesa desta dissertação, a quantidade de artigos relacionados com as palavras-chave digitadas no idioma português foram:

Tabela 1 – Quantidade de pesquisas relacionadas publicadas por palavra chave.

Palavra-Chave	Quantidade		Key-words	Amount
Normalização	109		Standardization	231k
Termorretificação	14		Thermorectification	3
Delaminação	6		Delamination	55k
Resistencia ao cisalhamento da linha de cola	3		Shear strength of the glue line	275

Fonte: Autoria Própria.

3.20 CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica realizada sobre o tema “análise da qualidade da colagem de elementos de MLC” possibilitou a observação dos seguintes aspectos:

De um modo geral, apesar do crescente interesse no estudo da qualidade de colagem de elementos de MLC, observou-se que as pesquisas experimentais nacionais, não haviam produzidos conclusões suficientes da qualidade de colagem de elemento de MLC, por não ter norma de referência, que foi publicada em 2022, portanto o trabalho atual é um dos primeiros a utilizar a recente norma brasileira.

Na prática, os elementos de MLC são confeccionados a partir da colagem das lamelas para diferentes combinações espécie/adesivo, mas poucos estudos abordam a questão da qualidade da superfície das lamelas para a colagem entre lamelas de madeira.

Vários são os parâmetros a serem observados na confecção de elementos de MLC para uma melhor resposta de delaminação e de resistência ao cisalhamento das linhas de cola, dentre eles: acabamento da superfície das lamelas, umidade de colagem, tipo (conífera ou folhosa) e região (cerne e alburno) da madeira, tipo de adesivo, pressão de colagem, espessura das lamelas, além da gramatura do adesivo com especificação de aplicação em uma ou duas lamelas, e viscosidade do adesivo.

Também não foram encontrados estudos relacionados a qualidade de colagem de madeiras termorretificadas comparadas com madeiras in natura e madeiras tratadas com CCA.

O uso de madeiras termorretificadas pode colaborar com o meio ambiente na questão de menos utilização de produtos químicos para o tratamento preservante. Também não foram encontrados estudos envolvendo a qualidade de colagem de madeiras termorretificadas a partir da norma brasileira ABNT NBR 7190-6 (2022).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CONFECÇÃO DAS LAMELAS E CPS PARA CARACTERIZAÇÃO

Foram utilizadas peças de madeira, in natura, tratadas com CCA e termorretificadas pelo método PlatoWood; de cada peça foram fabricadas (usinadas) 7 lamelas, descartando as lamelas laterais dos blocos (Figura 17-A).

Após a usinagem, as amostras foram devidamente identificadas e então os CP's de caracterização passaram por processo de secagem para alcance da umidade de $12 \pm 1\%$, de acordo com a ABNT NBR 7190-3 (2022), destas foram confeccionadas 12 vigas com 4 lamelas de cada combinação. Essa dissertação foi iniciada antes da publicação da ABNT NBR 7190 (2022) e consequentemente a caracterização das madeiras já havia sido iniciada.

Figura 17 – Peça termorretificada método PlatoWood e lamelas, (B) lamelas identificadas.



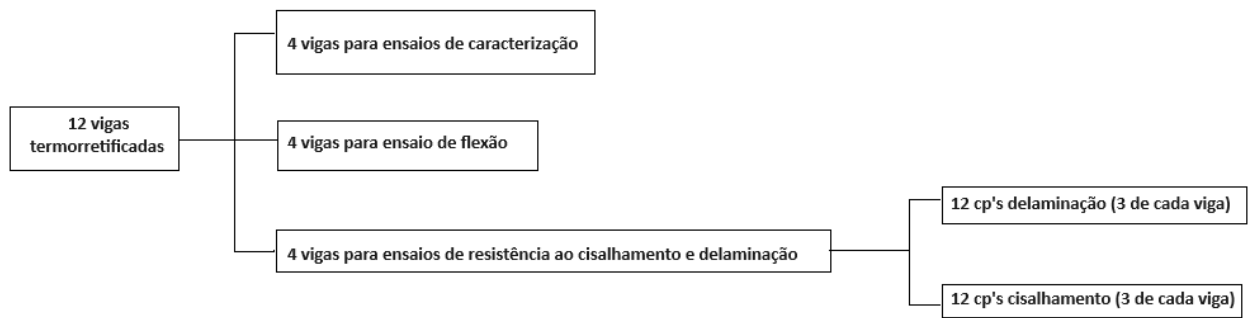
Fonte: Autoria própria.

Utilizou-se 4 vigas de cada combinação para os ensaios de flexão. 12 corpos de prova para os ensaios de resistência ao cisalhamento (cada corpo de prova = 3 linhas de cola), e utilizou-se 5 linhas de cola cisalhadas (5 corpos de prova) para os ensaios de percentual de ruptura madeira x adesivo e destas mesmas vigas confeccionou-se 12 corpos de prova, 3 de cada viga para os ensaios de delaminação.

Para os ensaios de caracterização utilizou-se 4 vigas de cada combinação, em que se confeccionou 4 corpos de prova para cada tipo de ensaio.

O fluxograma a seguir (Figura 17.1), apresenta a o processo de preparação dos corpos de prova de vigas termorretificadas, para efetuar os ensaios. O mesmo processo foi efetuado para as vigas tratadas com CCA e termorretificadas.

Figura 17.1 – Fluxograma processo praparação corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

Atingida a umidade de equilíbrio da madeira ao ar livre na região de Itapeva-SP (10-14%), os CP de caracterização foram depositados em sacos plásticos e acondicionados em ambiente de temperatura e umidade controlados para manutenção das condições adequadas até a data dos ensaios de caracterização.

4.2 ARMAZENAMENTO E CONTROLE DE UMIDADE DAS LAMELAS

As lamelas foram entabicadas logo após sua usinagem, ao atingir o teor de umidade aparente, específico da região sudoeste paulista que é 11-13%, as lamelas foram acondicionadas em sacos plásticos para controle de umidade até a utilização para fabricação das vigas de MLC (Figura 9). O controle do teor de umidade das lamelas e dos CP de caracterização foi realizado com o auxílio do medidor de umidade por contato Marrari M51.

Figura 18 – Lamelas condicionadas.



Fonte: Autoria própria.

Do total de lamelas usinadas, uma parte foi submetida ao tratamento preservativo com CCA no Laboratório de Preservação da Madeira da UNESP de Itapeva. O tratamento ocorreu sob pressão em autoclave, Figura 19.

Figura 19 – Tratamento preservativo CCA.



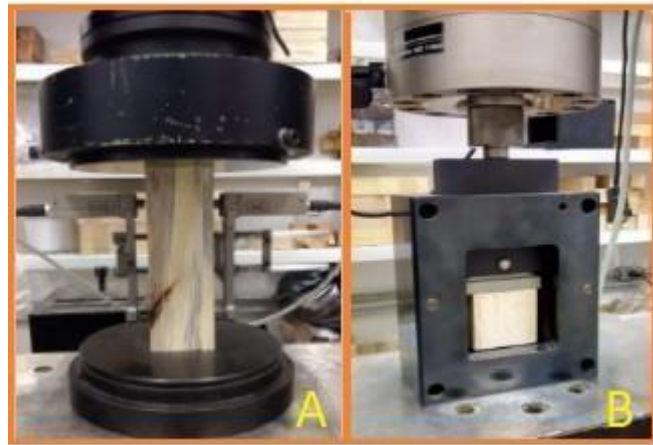
Fonte: Autoria própria.

4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização físicos e mecânicos da madeira foram conduzidos conforme a ABNT NBR 7190-3 (2022). Esse modelo de corpo de prova foi escolhido devido as limitações dimensionais da máquina de ensaios EMIC. Vale mencionar que de acordo com a nova norma brasileira ABNT NBR 7190 (2022) ensaios envolvendo madeiras de reflorestamento podem realizados envolvendo peças estruturais enquanto ensaios com madeiras nativas podem ser realizados em corpos de prova menores e isentos de defeitos.

Foram determinadas as propriedades: resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), resistência à tração paralela as fibras (f_{t0}), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) e os módulos de elasticidade na compressão e flexão estática na direção paralela às fibras ($E_{C0,m}$ e $E_{M,m}$), além da densidade aparente. A Figura 20 ilustra os ensaios de caracterização mecânica das amostras.

Figura 20 – Caracterização mecânica dos corpos-de-prova: (A) resistência compressão paralela as fibras; (B) resistência ao cisalhamento paralelo as fibras.



Fonte: Autoria própria.

4.4 CLASSIFICAÇÃO VISUAL

Esta etapa foi realizada com base nos critérios de classificação visual de peças estruturais da norma ABNT NBR 7190-2:2022, que classifica nas classes 1, 2 e 3, sendo a classificação 1 de melhor qualidade.

Foi confeccionado um gabarito em material transparente para facilitar a verificação dos tamanhos dos nós para atribuição das respectivas classes. A partir da classificação visual, as lamelas foram identificadas em função de suas classes para melhor organização, e, a partir das recomendações do projeto de norma, foram avaliados a presença de medula, tamanho de nós, encurvamento, arqueamento e torcimento.

Figura 21 – (A) Gabarito confeccionado, (B) posição dos nós, (C) exemplo classe 2.



Fonte: Autoria própria.

4.5 CONFECÇÃO DAS VIGAS DE MLC

A superfícies das lamelas pós classificação, foram usinadas (aplainadas), logo após o aplainamento as vigas seguiram para montagem/colagem, conforme recomendação técnica, para evitar contato com agentes externos no ambiente, tais como poeira e pó de serragem, que podem provocar alteração na porosidade, e por consequência alterar o potencial de penetração e enganchamento da cola.

As lamelas de melhor classificação visual, foram posicionadas nas extremidades superior e inferior das vigas, onde há maior solicitação de resistência mecânica durante os ensaios, os números de identificação (Figura 22-A) foram editados (Figura 22-B) para melhor identificação de cada viga para os ensaios, conforme a Figura 22-C, que apresenta o cp 4 ou viga 4 in natura, com lamelas numeradas de 1 a 4.

Figura 22 – (A) lamelas identificadas, (B) edição da identificação, (C) viga com lamelas posicionadas.



Fonte: Autoria própria.

Para colagem das vigas de MLC foi utilizada resina poliuretana KDG 1909 bicomponente, fabricada por KEHL Ind. e Com. Ltda. A gramatura utilizada foi de 240g/m² e o adesivo foi preparado conforme recomendação do fabricante (componentes adesivos = 1:1 e o tempo de montagem – colar, montar e prensar de no máximo 40 minutos), utilizando-se de balança semi-analitica para controlar a quantidade de adesivo, que foi aplicado com pincel nas faces das lamelas, em seguida, as lamelas com resina foram posicionadas, formando a viga (Figura 23).

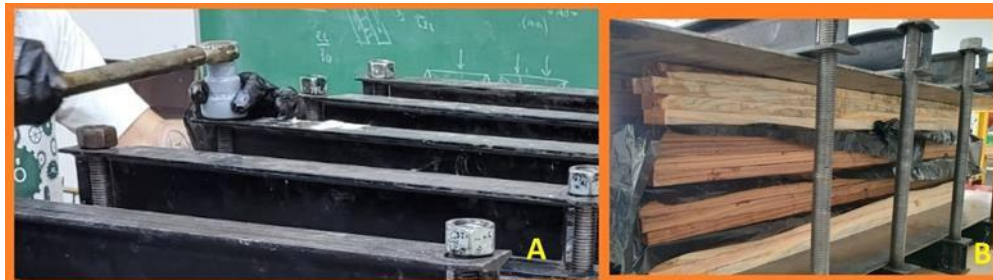
Figura 23 – Colagem das vigas, aplicação do adesivo (A), lamela com adesivo (B).



Fonte: Autoria própria.

Os procedimentos de prensagem das vigas tiveram duração de 72 horas cada para garantia da cura da resina e da prensagem adequada. Foram utilizados uma prensa de chão e um torquímetro para distribuição da pressão ao longo do comprimento das vigas. Para que fosse aplicada a pressão de forma uniforme e adequada ao longo de toda a viga, foi calculado o torque necessário em cada parafuso. Uma vez que as lamelas de Pinus apresentaram densidade aparente média inferior a $0,5 \text{ g/cm}^3$, foi aplicada a pressão de $0,7 \text{ MPa}$ (Figura 24).

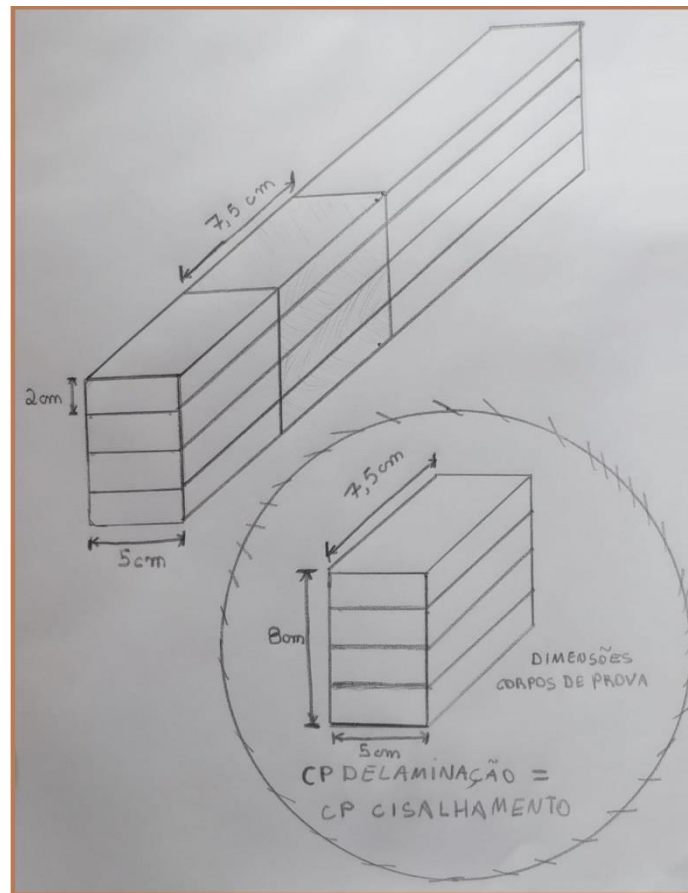
Figura 24 – Prensagem das vigas, aperto torquímetro (A), Prensagem Vigas (B).



Fonte: Autoria própria.

Ao fim das 72 horas, as vigas foram removidas da prensa e levadas para a desgrossadeira e para a serra circular, a fim de cortar as extremidades e uniformizar as superfícies dos elementos. Em seguida, os corpos-de-prova de delaminação e resistência na linha de cola foram retirados, sendo um total de 12 amostras de dimensões $8 \text{ cm} \times 7,5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ por viga. A Figura 14 apresenta o esquema para a retirada de tais amostras.

Figura 25 – Esquema dos corpos-de-prova de delaminação e cisalhamento.



Fonte: Autoria própria.

4.6 ENSAIO DE DELAMINAÇÃO NAS LINHAS DE COLA

Para este ensaio, utilizou-se uma autoclave em formato cilíndrico, do tipo célula cheia, com comprimento de 105 cm, diâmetro de 48 cm e aproximadamente 1,10 cm de espessura de parede. O equipamento conta com uma bomba de vácuo com manômetro, cuja capacidade é de 75 kPa, e um tambor para armazenamento de água a ser utilizada no ensaio de delaminação. Outro cilindro, do tipo kitassato, está acoplado ao equipamento para controle do excesso de água ao longo da etapa de vácuo. Para a etapa de pressão, foi utilizado um sistema externo de ar comprimido, cuja magnitude é controlada a partir de um manômetro. As ligações entre cilindros, manômetros e tambor de água é promovido pela presença de canos metálicos. Para garantia da imersão dos corpos-de-prova em água ao longo do ensaio, é utilizada ainda uma chapa moeda no interior da autoclave.

Figura 26 – Equipamento para ensaios de delaminação nas linhas de cola.



Fonte: Autoria própria.

Ao início do procedimento, os corpos-de-prova foram depositados no interior da autoclave e a grelha foi colocada sob os mesmos, de forma a garantir que as amostras fiquem submersas ao longo da etapa de pressão. O ensaio de delaminação seguiu o procedimento proposto pela ABNT NBR 7190-6:2022 para ambientes externos: efetuado um ciclo de vácuo seguido de dois ciclos de pressão e na sequência secagem controlada em estufa (Figura 27).

Figura 27 – Ensaio de delaminação: circuito (A), reservatório (B), câmara (C), grade (D), tampa câmara (E), manômetro (F), secagem amostras (G).

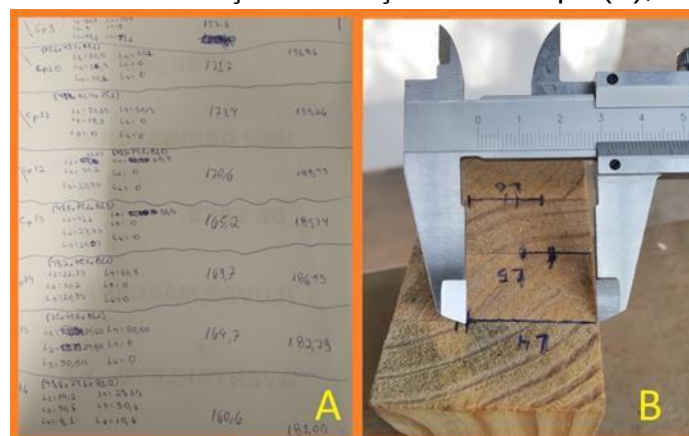


Fonte: Autoria própria.

Após a secagem em estufa que durou em média 20 horas quantificou-se com auxílio de paquímetro as aberturas nas linhas de cola nas faces frontal e de fundo dos corpos de prova submetidos ao processo de delaminação.

A Figura 28, mostra os detalhes do processo de tomada das medidas das aberturas das linhas de cola.

Figura 28 – Ensaio Delaminação: anotações de campo (A), medida linha (B).



Fonte: Autoria própria.

4.7 ENSAIO DE CISALHAMENTO DAS LINHAS DE COLA

Para o ensaio de resistência na linha de cola, foi utilizada a máquina universal de ensaios EMIC, de capacidade de 300 kN e um dispositivo metálico aplicado a mesma.

Foram ensaiados quatro corpos-de-prova por elemento de MLC. O ensaio foi conduzido conforme o projeto de norma ABNT NBR 7190-6:2022 e, para tal, foi confeccionado um dispositivo para aplicação da força de cisalhamento na linha de cola, na direção das fibras, conforme a Figura 29.

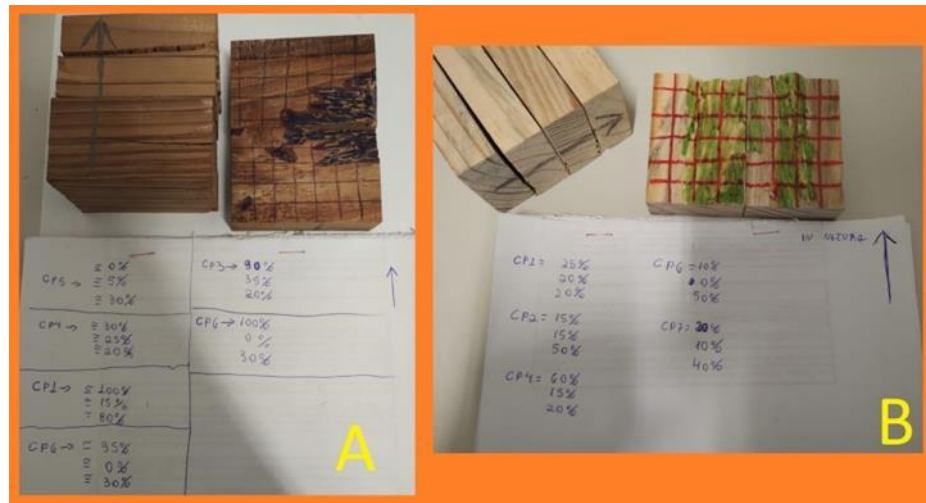
Figura 29 – Dispositivo de aplicação de força de cisalhamento na linha de cola.



Fonte: Autoria própria.

Após os ensaios de cisalhamento foram avaliadas as porcentagens de ruptura nas regiões rompidas. Utilizou-se o método da malha quadriculada para quantificar as porcentagens de ruptura na madeira e no adesivo. A Figura 30, seguinte apresenta os detalhes da malha quadriculada utilizada para as regiões de colagem.

Figura 30 – Corpos de Prova Cisalhamento, avaliação dos modos de ruptura na interface adesiva: Termorretificado (A), In Natura (B).



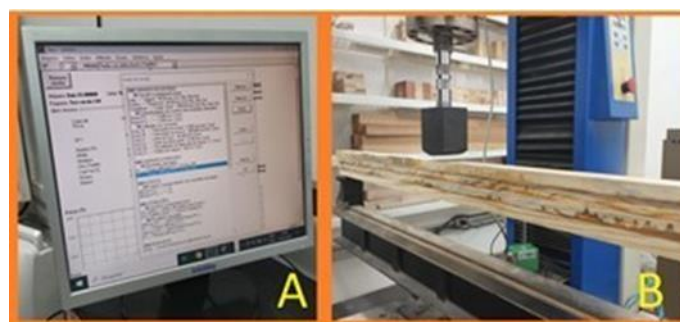
Fonte: Autoria própria.

4.8 ENSAIO DE FLEXÃO DAS VIGAS

Após os ensaios de cisalhamento das linhas de cola foram realizados os ensaios de flexão das vigas com cargas concentrada no meio do vão. Os ensaios de flexão foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC. Os ensaios de flexão serviram para determinar as propriedades de resistência e de rigidez das peças além de analisar os modos de ruptura.

A Figura 31 mostra os detalhes do ensaio de flexão em andamento no laboratório de propriedades dos materiais da UNESP/Itapeva.

Figura 31 – Detalhe do ensaio de flexão laboratório materiais.



Fonte: Autoria própria.

4.9 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS

As resistências ao cisalhamento das linhas de cola obtidas foram analisadas com base em análises estatísticas efetuadas nos softwares R[12] e excel. As análises estatísticas, neste caso, tiveram a intenção de avaliar se as médias das resistências ao cisalhamento das linhas de cola apresentavam diferenças significativas a um nível de significância de 5%. As análises estatísticas partiram inicialmente da hipótese nula (H_0), de que as médias da resistência ao cisalhamento das linhas de cola entre os tratamentos eram estatisticamente equivalentes. A hipótese alternativa (H_1) foi de que as referidas resistência ao cisalhamento das linhas de cola não eram estatisticamente equivalentes. Os testes estatísticos realizados foram: Bartlett's test, Shapiro-Wilk e t- test.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Nas tabelas seguintes são apresentados os valores de caracterização das madeiras in natura, termorretificadas e tratadas com CCA utilizadas para a confecção das vigas de MLC.

Tabela 2 – Caracterização da Madeira das vigas In Natura [U = 12%].

<i>In Natura</i>								
Viga	Lamela	Classificação Visual	E _M (MPa)	E _{c0} (MPa)	fc0,m (MPa)	ft0,m (MPa)	fv0,m (MPa)	ρ _{ap} (kg/m³)
1	1	2	16193	17992	57,12	74,18	8,22	467
	2	2	16127	16908	58,94	76,55	7,89	459
	3	1	17783	18759	60,59	78,69	7,56	440
	4	2	15166	16851	49,22	63,92	7,51	459
2	1	3	16192	17991	61,43	79,78	9,58	460
	2	2	15432	17026	58,94	76,55	7,17	476
	3	2	14999	16666	49,22	63,92	7,51	492
	4	2	17147	18830	57,27	74,18	8,22	472
3	1	2	19079	21199	49,82	59,64	7,27	427
	2	2	14284	15871	61,43	79,78	9,58	448
	3	2	19048	20187	60,59	78,69	7,56	442
	4	2	15868	17631	49,22	63,92	7,51	483
4	1	2	16036	17818	61,43	79,78	9,58	481
	2	1	15805	17561	60,59	78,69	7,56	419
	3	2	14078	15474	49,22	63,92	7,73	432
	4	2	14518	16131	49,22	63,92	7,51	451
Média			16110	17681	56	72	8	457
Desvio Padrão			1459	1472	5	7	1	21
CV (%)			9,06	8,32	9,38	10,06	10,10	4,51

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Caracterização da Madeira das vigas tratadas com CCA [U = 12%].

CCA								
Viga	Lamela	Classificação Visual	E _M (MPa)	E _{c0} (MPa)	f _{c0,m} (MPa)	f _{t0,m} (MPa)	f _{v0,m} (MPa)	ρ _{ap} (kg/m ³)
1	1	2	19079	21199	44,17	57,36	7,09	435
	2	2	14284	15871	61,43	79,78	9,58	448
	3	2	19048	21164	60,59	78,69	7,56	442
	4	2	15868	17631	49,22	63,92	7,51	483
2	1	2	16036	17818	61,43	79,78	9,58	481
	2	1	15805	17561	60,59	78,69	7,56	419
	3	1	13927	15474	49,22	63,92	7,51	405
	4	2	14518	16131	49,22	63,92	7,51	451
3	1	2	16193	17992	57,12	74,18	8,22	467
	2	2	15217	16908	58,94	76,55	7,17	414
	3	1	17783	19759	60,59	78,69	7,56	415
	4	2	15166	16851	49,22	63,92	7,51	459
4	1	1	16192	17991	61,43	79,78	9,58	460
	2	2	15323	17026	58,94	76,55	7,17	476
	3	2	14999	16666	49,22	63,92	7,51	492
	4	2	17147	19052	57,12	74,18	8,22	472
Média			16037	17818	55,53	72,11	7,93	451
Desvio Padrão			1540	1711	5,99	7,78	0,88	27
CV (%)			9,60	9,60	10,78	10,78	11,04	6

Fonte: Autoria própria.

Observou que os resultados das amostras de madeira termorretificadas foram inferiores as amostras In Natura e tratadas com CCA, e isso concordou com os resultados apresentados por KARTAL, HWANG, IMAMURA (2007), afirmando que quando a madeira é exposta a altas temperaturas, neste caso a 160°C, em que ocorre desidratação e oxidação da celulose, degradação da lignina e grupos acetila de hemiceluloses reagem formando ácido acético, fazendo com que as propriedades químicas e mecânicas sofram influências.

Tabela 4 – Caracterização da Madeira das vigas Termorretificadas [U = 12%].

Termorretificadas								
Viga	Lamela	Classificação Visual	E _M (MPa)	E _{c0} (MPa)	fc0,m (MPa)	ft0,m (MPa)	fv0,m (MPa)	ρ _{ap} (kg/m ³)
1	1	1	13193	14992	46,62	59,18	6,42	466,05
	2	1	12217	13908	48,44	61,55	5,37	413,05
	3	2	14783	16759	50,09	63,69	5,76	414,05
	4	1	12166	13851	38,72	48,92	5,71	458,05
2	1	2	13192	14991	50,93	64,78	7,78	459,05
	2	1	12323	14026	48,44	61,55	5,37	475,05
	3	2	11999	13666	38,72	48,92	5,71	491,05
	4	1	14147	16052	46,62	59,18	6,42	471,05
3	1	2	16079	18199	33,67	42,36	5,29	434,05
	2	1	11284	12871	50,93	64,78	7,78	447,05
	3	2	16048	18164	50,09	63,69	5,76	441,05
	4	2	12868	14631	38,72	48,92	5,71	482,05
4	1	1	13036	14818	50,93	64,78	7,78	480,05
	2	1	12805	14561	50,09	63,69	5,76	418,05
	3	1	10927	12474	38,72	48,92	5,71	404,05
	4	2	11518	13131	38,72	48,92	5,71	450,05
Média			13037	14818	45,03	57,11	6,13	450,24
Desvio Padrão			1540	1711	5,99	7,78	0,88	27,35
CV (%)			11,81	11,55	13,30	13,62	14,28	6,08

Fonte: Autoria própria.

Observou-se que os resultados das amostras de madeira In Natura em relação a madeira tratada com CCA foram semelhantes quando comparado o valor médio, isso ocorreu por serem amostras do mesmo lote de madeiras e porque o tratamento químico não alterou a estrutura física da madeira.

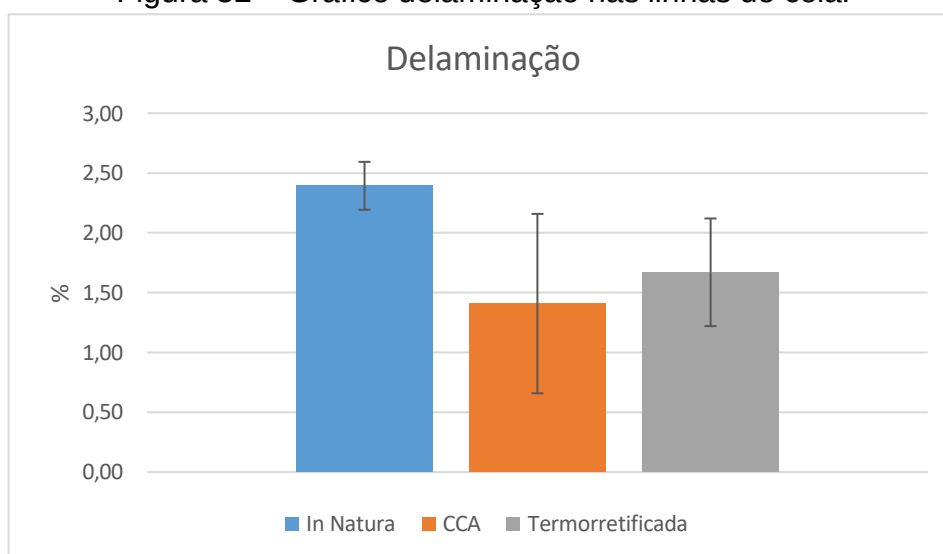
5.2 RESULTADOS ENSAIOS DE DELAMINAÇÃO

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de delaminação nas linhas de cola das vigas.

Amostra	CP	Delaminação <i>In natura</i> (%)	Delaminação CCA (%)	Delaminação Termorretificada (%)
Viga1	1	2,49	4,39	2,46
	2	2,48	0	1,18
	3	3,11	0	0
Viga 2	1	2,44	3,71	2,17
	2	1,48	0	1,42
	3	1,94	0	2,06
Viga 3	1	2,57	1,48	2,38
	2	2,31	2,99	2,19
	3	2,57	0	0
Viga 4	1	2,37	2,68	2,74
	2	2,67	0	1,97
	3	2,29	1,65	1,43
Média		2,39	1,41	1,67
Desvio Padrão		0,40	1,14	0,90
CV (%)		16,57	80,77	100,20

Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Gráfico delaminação nas linhas de cola.



Fonte: Autoria própria.

Observou-se nas médias dos resultados que as amostras termorretificadas e as amostras de CCA apresentaram resultados próximos: 1,41% e 1,67%, respectivamente, e que a amostra in natura apresentou maior percentual, 2,39% de delaminação. No entanto, a maior dispersão dos resultados foi observada para as amostras de madeiras termorretificadas, pois a madeira termorretificada tende a romper de forma mais frágil quando comparada com as madeiras tratadas com CCA e in natura. Todas as amostras apresentaram limites de delaminação satisfatórios de acordo com especificado na norma ABNT NBR 7190-6:2022 que tem como base a EN 14080:2013, as quais indicam 4% para o percentual máximo de delaminação permitido para madeiras do tipo coníferas. Para folhosas esse percentual é de 6%.

Após análise estatística com 95% de confiança, os resultados indicaram que houve diferenças significativas entre as porcentagens de delaminação das linhas de cola com madeiras in natura em relação as madeiras termorretificadas, embora todas as situações analisadas tenham resultados em porcentagem de delaminação inferior a 4%.

5.3 RESULTADOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NAS LINHAS DE COLA

As Tabelas seguintes apresentam os resultados obtidos para os ensaios de resistência ao cisalhamento na linha de cola obtidos para as combinações de vigas de MLC ensaiadas.

Observou-se as vigas fabricadas com madeiras tratadas com CCA tiveram melhores resultados de resistência ao cisalhamento das linhas de cola em relação as vigas com madeiras termorretificadas e que ambas apresentaram resultados superiores as vigas de madeira in natura, sendo os valores de resistência iguais a 9,88MPa, 8,49MPa e 7,51MPa, respectivamente.

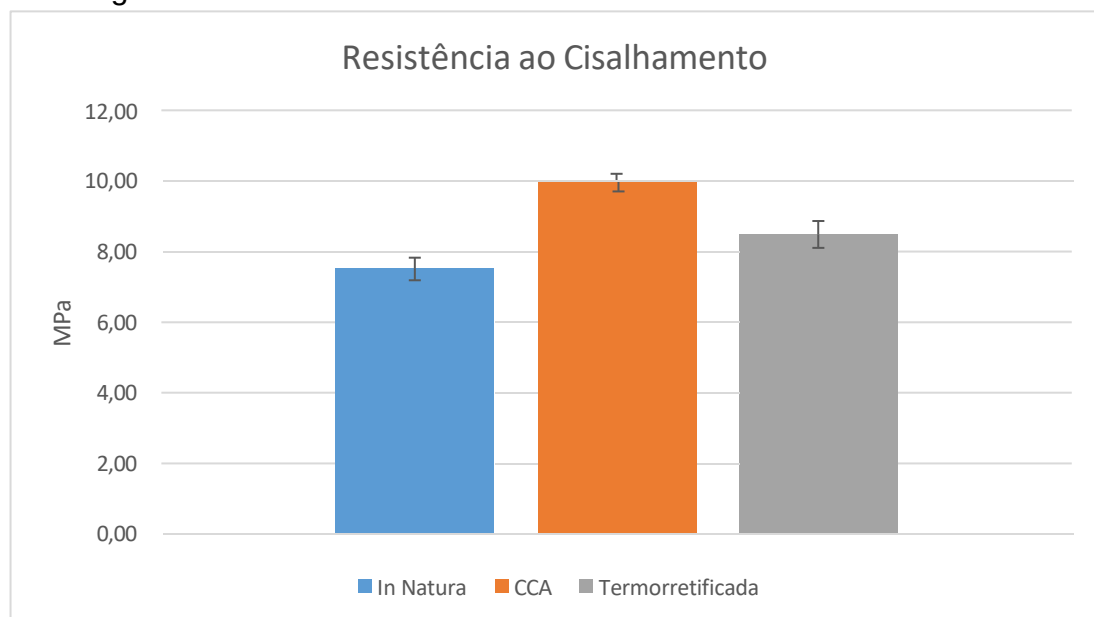
As análises estatísticas indicaram que existiram diferenças significativas entre os resultados de resistência das amostras com madeiras tratadas (CCA e termorretificadas) com relação as amostras de madeira in natura, demonstrando que há influência dos tratamentos preservantes na resistência ao cisalhamento nas linhas de cola de vigas de MLC.

Tabela 6 – Valores de resistência ao cisalhamento nas linhas de cola.

Amostra	CP	In Natura (MPa)	CCA (MPa)	Termorretificada (MPa)
Viga 1	1	6,58	10,14	8,42
	2	6,88	8,97	8,25
	3	6,81	9,47	8,23
Viga 2	1	8,28	9,81	7,41
	2	8,53	9,64	8,7
	3	8,35	9,8	7,58
Viga3	1	7,34	10,82	9,65
	2	7,45	8,99	9,85
	3	7,51	10,47	9,44
Viga 4	1	7,1	10,63	8,14
	2	7,7	10,47	8,18
	3	7,56	9,38	7,98
Média		7,51	9,88	8,49
Desvio Padrão		0,63	0,63	0,78
CV (%)		8,36	6,34	9,23

Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Gráfico resistência ao cisalhamento nas linhas de cola.



Fonte: Autoria própria.

5.4 RESULTADOS PERCENTUAIS DE QUEBRA NAS REGIÕES DE MADEIRA X ADESIVO NAS LINHAS DE COLA

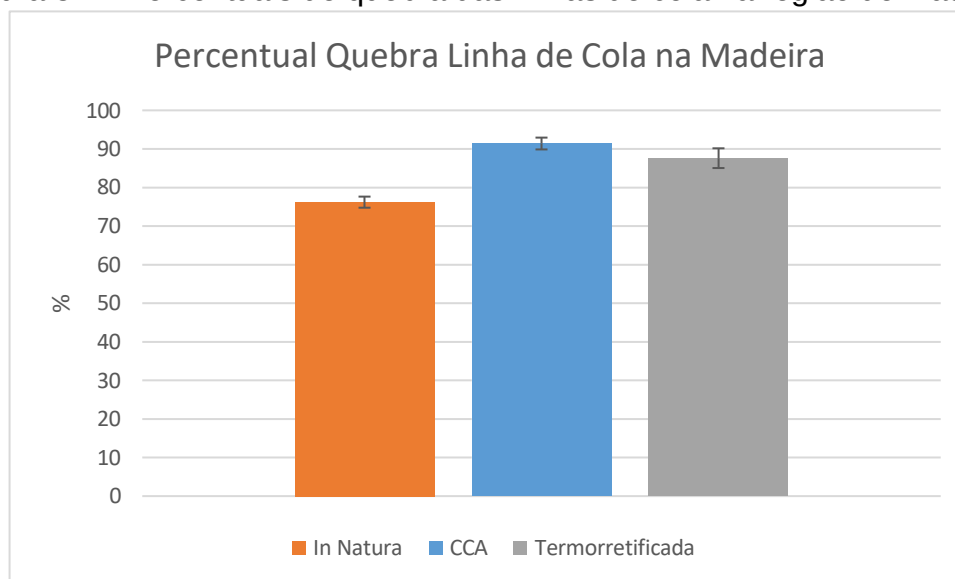
A Tabela 6, apresenta o percentual de ruptura nas regiões de madeira e de adesivo na área ou região de colagem das vigas dos corpos de prova cisalhados:

Tabela 7 – Resultados Percentuais da quebra madeira x adesivo nas linhas de cola.

AMOSTRAS (CP)	IN natura		Tratamento CCA		Termorretificada	
	Madeira (%)	Adesivo (%)	Madeira (%)	Adesivo (%)	Madeira (%)	Adesivo (%)
1	73,00	27,00	92,00	8,00	90,00	10,00
2	75,00	25,00	95,00	5,00	88,00	12,00
3	85,00	15,00	90,00	10,00	87,00	13,00
4	75,00	25,00	87,00	13,00	83,00	17,00
5	73,00	27,00	93,00	7,00	90,00	10,00
Média	76,20	23,80	91,40	8,60	87,60	12,40
Desvio padrão	5,02		3,05		2,88	
CV(%)	6,59	21,09	3,34	35,46	3,29	23,23

Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Percentuais de quebra das linhas de cola na região de madeira.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados indicaram que todas as combinações espécie adesivo tiveram boa qualidade de colagem. No entanto, as madeiras tratadas com CCA tiveram maior

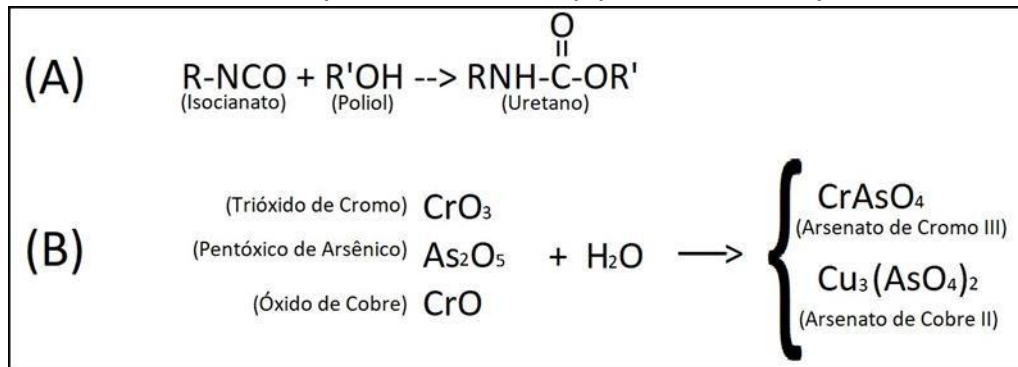
porcentagem de ruptura na madeira (91%) seguidas das madeiras termorretificadas (88%) e in natura (76%). Esses resultados foram condizentes com as porcentagens de delaminação e com as resistências ao cisalhamento das linhas de cola obtidas.

Em relação as amostras termorretificadas, observou-se que quando a madeira é exposta a altas temperaturas, ocorre a desidratação e oxidação da celulose, hemicelulose e lignina (KARTAL, HWANG e IMAMURA, 2007). Esta desidratação, provoca a degradação ou quebra das estruturas químicas da madeira, que pode promover o aumento da porosidade da superfície, influenciando de forma positiva na qualidade de colagem.

A influência do tratamento com CCA na qualidade de colagem pode ocorrer por diferenças de porosidade devido a impregnação das substâncias e, considerando que os componentes do adesivo poliuretano, que são polioli e isocianato, que ao serem misturados na proporção 1:1 formam a substância uretano (adesivo aplicado).

No entanto, a substância adesiva pode fazer ligações com radicais livres e formar substâncias iônicas, com metais dissociados e impregnados na madeira durante o processo de tratamento (Figura 35).

Quadro 1 – Substâncias químicas adesivo (A), substâncias químicas CCA (B).



Fonte: Autoria própria.

5.5 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de resistência à flexão das vigas.

Vigas	IN natura		Tratamento CCA		Termorretificada	
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
1	16970	110	17070	109	13090	105
2	15374	100	15072	105	12915	103
3	15077	104	16090	107	14070	108
4	16932	107	15915	106	12072	99
Média	1003,69	4,27	819,83	1,71	820	4
Desvio Padrão	1003,69	4,27	819,83	1,71	820	4
CV (%)	6,24	4,06	5,11	1,6	6	4

Fonte: Autoria própria.

A Figura 36, mostra a ruptura predominante obtido nos ensaios de flexão, ruptura por tração da madeira na fibra inferior, como já era esperado.

Figura 35 – Substâncias químicas adesivo (A), substâncias químicas CCA (B).



Fonte: Autoria própria.

Observou-se nos resultados apresentados, após análise estatística que as amostras in natura em relação as amostras termorretificadas apresentaram diferenças significativas, o mesmo ocorreu com as amostras termorretificadas em relação as amostras tratadas com CCA. As amostras in natura em relação as amostras de CCA não apresentaram diferenças significativas, porque com este tipo de tratamento

químico, o sal dissociado em meio aquoso impregna na madeira e não altera a estrutura física.

As amostras submetidas a termorretificação, apresentaram valores de resistência inferiores com diferenças significativas, comprovando a afirmativa de que o tratamento térmico da madeira, provoca degradação parcial da estrutura química, influenciando na perda de propriedades de resistência mecânica.

6 CONCLUSÃO

O método de ensaio para avaliar a qualidade de colagem, proposto pela ABNT NBR 7190-6 (2022) mostrou-se adequado e possibilitou a avaliação da delaminação e da resistência ao cisalhamento das linhas de cola.

As amostras tratadas com CCA e termorretificadas apresentaram, de forma geral, melhores resultados nos ensaios de qualidade de colagem com base na ABNT NBR 7190-6 (2022), quando comparados com a madeira in natura.

Os melhores resultados de qualidade de colagem foram obtidos para as amostras tratadas com CCA, seguida das amostras termorretificadas e in natura respectivamente, cuja porcentagem de delaminação ficou abaixo de 4%.

Os valores dos resultados dos ensaios de flexão das vigas, demonstraram que as amostras termorretificadas apresentaram valores inferiores as demais combinações, com diferenças estatísticas significativas.

Destaca-se que as diferenças significativas favoreceram as vigas de madeira tratadas, no entanto as vigas de madeira in natura também estiveram de acordo com os preceitos da ABNT NBR 7190-6 (2022).

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Testar outras combinações espécie-adesivo para outras temperaturas de termorretificação;
- Testar outras combinações espécie-adesivo tratadas com CCA;
- Testar diferentes combinações espécie-adesivo para ambientes internos nos quais os ciclos de delaminação são diferentes.
- Realizar pesquisa específica para avaliar as diferenças de valores de resistência mecânica entre as madeiras tratadas e in natura, para verificar se há alteração na classificação de uso estrutural da espécie *Pinus sp.*

REFERÊNCIAS

ALONSO, D. M. *et al.* Integrated conversion of hemicellulose and cellulose from lignocellulosic biomass. **Energy Environ. Sci.**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 76-80, 2013. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c2ee23617f>.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1**: projeto de estruturas de madeira – parte 1: critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-2**: projeto de estruturas de madeira – parte 2: critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-3**: projeto de estruturas de madeira – parte 3: métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-6**: projeto de estruturas de madeira – parte 6: métodos de ensaio para madeira lamelada colada estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PN 02:126.10-001-1**: Madeiras – Critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira de florestas plantadas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PN 02:126.10-0001-5**: Madeira laminada colada estrutural: métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

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

CALIL NETO, C. *et al.* Avaliação da resistência ao cisalhamento e à delaminação em madeira laminada colada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 24, n. 4, p. 989-996, 2014.

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

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 112.9**: evaluation of adhesives for structural wood products (exterior exposure). Mississauga: CSA, 2004.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 112.10**: evaluation of adhesives for structural wood products (limited moisture exposure). Mississauga: A, 2007.

CARPINTERIA. **Que tipo de estrutura você procura?**. São Paulo: Carpinteria, [S.d.]. Disponível em: <https://carpinteria.com.br/>. Acesso em 20 jun. 2019. il. color.

CAVALHEIRO, R. S. **Madeira Laminada Colada de Schizolobium amazinicum Herb. (Paricá)**: combinação adesivo/tratamento preservante. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CERCHIARI, A. M. F. **Aprimoramento do poliuretano a base de óleo de mamona na manufatura de madeira laminada colada (MLC) de Cupressus lusitanica, Corymbia maculata e Hevea brasiliensis**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

DERIKVAND, M.; PANGH, H. A modified method for shear strength measurement of adhesive bonds in solid wood. **BioResources**, Raleigh, v. 11, n.1, p. 354-364. 2016.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. A densidade aparente como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, v. 8, n. 3, p. 54-56, maio/ago. 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 301**: adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures - classification and performance requirements. Brussels: CEN, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 385**: finger-jointed structural timber – performance requirements and minimum production requirements. Brussels: CEN, 2001.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 391**: glued laminated timber – delamination test of glue lines, Brussels: CEN, 2001.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 408**: timber structures. structural timber and glued laminated timber. determination of some physical and mechanical properties. Brussels: CEN, 2011.

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

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 8 p.

INTERNATIONAL THERMOWOOD ASSOCIATION. **TermoWood 2003**. Disponível em: <https://www.thermowood.fi/>. Acesso em: 2023.

KARTAL, S. N.; HWANG, W. J.; IMAMURA, Y. Water absorption of boron-treated and heat-modified wood. **Journal Of Wood Science**, [S.L.], v. 53, n. 5, p. 454-457, out. 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-007-0877-9>.

LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. Universidade de São Paulo: São Carlos, 1998. 200 f.

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

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

PORTAL CELULOSE. Como o setor florestal brasileiro se tornou referência em manejo sustentável. **Portal Celulose**, [S.L.], 2022. Disponível em: <https://portalcelulose.com.br/como-o-setorflorestal-brasileiro-se-tornou-referencia-em-manejo-sustentavel/>. Acesso em: 05 abr. 2024.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* Avaliação de vigas de madeira laminada colada de Cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.). **Cerne**, Lavras, MG, v. 19, n. 3, p. 441-449, 2013.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* Caracterização da madeira laminada colada de Eucalyptus sp. produzida com adesivos resorcinol-fenol- formaldeído e poliuretano. **Ciência da madeira**: Brazilian journal of wood science, Pelotas, v. 9, n.2, p. 123-133, 2018.

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

ZENID, G. J. *et al.* **Madeira**: uso sustentável na construção civil. 2.ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2009.

ZHANG. J; KAMDEM, D. P. Interaction of copper-amine with southern pine: retention and migration. **Wood and fiber science**, Burnaby, v.32, n. 3,p. 332-339, 2000.