



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

JULIANA BELLO MUSSI ALENCAR

**SISTEMA CONSTRUTIVO EM MADEIRA LAMINADA
COLADA CRUZADA OU *CROSS LAMINATED TIMBER*
(CLT):
ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA MADEIRA COM
BAIXO VALOR AGREGADO**

Londrina
2015

JULIANA BELLO MUSSI ALENCAR

**SISTEMA CONSTRUTIVO EM MADEIRA LAMINADA
COLADA CRUZADA OU *CROSS LAMINATED TIMBER*
(CLT):
ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA MADEIRA COM
BAIXO VALOR AGREGADO**

Defesa apresentada ao Programa Associado de Pós-Graduação em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo das Universidades Estaduais de Londrina e Maringá para obtenção do título de Mestre.

Orientador. Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo Moura.

Londrina
2015

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da
Universidade Estadual de Londrina**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

A368s Alencar, Juliana Bello Mussi.

Sistema construtivo em madeira laminada colada cruzada ou *cross laminated timber* (CLT) : análise da viabilidade técnica da madeira com baixo valor agregado / Juliana Bello Mussi Alencar. – Londrina, 2015.

103 f. : il.

Orientador: Jorge Daniel de Melo Moura.

Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa Associado de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2015.

Inclui bibliografia.

1. Arquitetura de habitação – Teses. 2. Estruturas de madeira – Teses. 3. Engenharia de estruturas – Teses. 4. Lâminas de madeira – Classificação – Teses. I. Moura, Jorge Daniel de Melo. II. Universidade Estadual de Maringá. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

CDU 728.222

JULIANA BELLO MUSSI ALENCAR

**SISTEMA CONSTRUTIVO EM MADEIRA LAMINADA COLADA
CRUZADA OU *CROSS LAMINATED TIMBER* (CLT): ANÁLISE DA
VIABILIDADE TÉCNICA DA MADEIRA COM BAIXO VALOR
AGREGADO**

Defesa de dissertação aprovada como requisito para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Metodologia de Projeto, área de concentração em Arquitetura e Urbanismo do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo
Moura
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Everaldo Pletz
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo – USP

Prof. Dr. Ricardo Dias Silva
Universidade Estadual de Maringá – UEM

Londrina, 27 de abril de 2015.

Dedico este trabalho a Deus e a minha
família.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao meu orientador não só pela constante orientação neste trabalho, mas sobretudo pela sua amizade, incentivo e paciência.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação pelo conteúdo ministrado com carinho e dedicação.

Aos amigos e colegas que tanto me incentivaram e me apoiaram.

Gostaria de agradecer a empresa Tecnomade, que cedeu gentilmente as peças de medula de eucalipto e a empresa Akzonobel que cedeu o adesivo melanina-ureia-formaldeído para a pesquisa.

Ao Carlos Alberto Duarte, técnico da maquetaria da Universidade Estadual de Londrina- UEL, que, com extrema dedicação, ajudou na execução e elaboração dos testes.

Ao Departamento de Construção Civil, especialmente à Prof^a Berenice Martins Toralles pela cessão dos equipamentos e local do laboratório de materiais da Universidade Estadual de Londrina- UEL.

Agradeço a minha família pelo apoio e compreensão em todos os momentos.

ALENCAR, Juliana Bello Mussi. **Sistema Construtivo em Madeira Laminada Colada Cruzada ou *Cross Laminated Timber* (CLT)**: Análise da viabilidade técnica da madeira com de baixo valor agregado. 2015. 103 f. Dissertação do Mestrado em Metodologia do Projeto Programa de Pós-Graduação em Metodologia de Projeto, área de concentração em Arquitetura e Urbanismo, do Centro de Tecnologia e Urbanismo- Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

RESUMO

O Sistema Construtivo *Cross Laminated Timber* ou CLT (madeira laminada colada cruzada), desenvolvido primeiramente na Áustria e Alemanha, tem despontado recentemente como uma excelente alternativa para a construção civil. Composto por painéis estruturais de 3 a 10 camadas, colados transversalmente um ao outro, o CLT pode ser elaborado com duas espécies de madeira diferentes. As peças de madeira utilizadas para a composição dos painéis CLT devem ser classificadas de forma visual e mecânica para determinar as propriedades de resistência e rigidez, a flexão, cisalhamento, tração e compressão. Madeira proveniente de florestas plantadas e com rápido crescimento, apresentam baixa densidade e qualidades estruturais. A região de Telêmaco Borba-PR possui uma extensa área de floresta plantada e indústrias de serrarias. Nesta região, assim como a indústria de madeira serrada em geral produzem uma grande quantidade de peças de madeira de baixo valor agregado, como peças de pequeno comprimento de pinus e peças provenientes da medula do eucalipto. O objetivo deste trabalho, de acordo com os conceitos de pesquisa experimental e objetivos exploratórios é a análise da qualidade e desempenho estrutural dos painéis CLT, elaborados com as espécies de *Pinus ssp* e medula de *Eucalyptus grandis*. Todas as tábuas utilizadas na pesquisa foram classificadas de forma visual e mecanicamente, resultando em agrupamentos de MOEestático, para elaboração de quatro grupos de painéis CLT, com 3 camadas. O trabalho foi dividido em duas etapas: a primeira teve como objetivo a escolha do melhor tipo de adesivo a ser utilizado nos painéis CLT através de testes mecânicos, conforme a norma NBR 7190/97. Foram ensaiados 72 corpos de provas representativos de painéis CLT, utilizando os adesivos estruturais Melanina Ureia Formaldeído (MUF) e Ureia-formaldeído (UF). Os corpos de prova foram subdivididos em grupos e colados com orientação paralela e perpendicular as fibras, combinando as espécies pinus e eucalipto. A orientação paralela às fibras é a mesma dos painéis CLT. A análise dos resultados obtidos nos testes de determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal da colagem entre o pinus e o eucalipto e entre as mesmas espécies, apontou melhor desempenho para o adesivo MUF, para a combinação pinus/pinus nas colagens no dois sentido, paralelo e perpendicular às fibras. A segunda etapa consistiu no ensaio em laboratório dos painéis estruturais CLT. Foram ensaiados a flexão, 16 painéis agrupados em quatro tipos: um somente com pinus, outro com eucalipto e dois grupos combinando as duas espécies, um com pinus na camada interna e outro com eucalipto na camada interna. Os resultados observados nos testes de resistência e rigidez e a flexão executados nos painéis CLT apontaram para uma maior flexibilidade e resistência para os painéis elaborados com pinus assim como uma alta rigidez e baixa resistência para os painéis contendo eucalipto. Estes resultados foram comparados com os valores mínimos indicados pelas normas e na literatura consultada

mostrando desta forma a viabilidade do uso desta madeira de baixo valor agregado para a produção de painéis CLT.

Palavras-chave: *Cross Laminated Timber* (CLT). Classificação visual. Ultrassom. Adesivos. Madeira de reflorestamento.

ALENCAR, Juliana Bello Mussi. **Cross Laminated Timber (CLT) Construction System:** Technical feasibility analysis of use of wood with low added value. 2015. 103 p. Defesa da dissertação do Mestrado em Metodologia do Projeto Programa de Pós-Graduação em Metodologia de Projeto, área de concentração em Arquitetura e Urbanismo, do Centro de Tecnologia e Urbanismo- Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

ABSTRACT

The Cross Laminated Timber Construction System or CLT, first developed in Austria and Germany, has recently emerged as an excellent alternative for the construction industry. Composed of structural panels 3-10 layers glued across each other, CLT can be prepared with two different species of wood. The wooden parts used for the composition of CLT panels are classified visually and mechanically to determine the strength and stiffness, bending, shear, tension and compression. Wood from planted forests and rapid growth, have low density and structural qualities. The region of Telemaco Borba-PR has an extensive area of planted forest and sawmill industries. In this region, as well as sawn timber industry in general produce a large amount of low-value wood pieces, like pieces of small length of Pinus and parts from Eucalyptus cord. The main goal was to examine the quality and structural performance of CLT panels, made with pine and eucalyptus pith. All boards were classified visually and mechanically, resulting in four groups of CLT panels, with 3 layers. The work was divided into two phases: the first was the determination of the type of adhesive used in CLT panels, according to NBR 7190/97, 72 representative specimens were tested, using structural adhesives Urea Formaldehyde Melanin (MUF) and Urea-formaldehyde (UF). These groups were subdivided and bonded with parallel and perpendicular fibers, combining the pine and eucalyptus species. The fibers parallel orientation was the same one adapted for the CLT panels. The second phase consisted of laboratory test of structural panels CLT. Were tested in bending panels 16 grouped into four types: one with only pine, eucalyptus and other two groups by combining two species, one with the inner layer pine and eucalyptus other with the inner layer. The results obtained in stress tests and rigidity and bending performed in CLT panels pointed to greater flexibility and resistance to the panels made with pine and a high rigidity and low resistance for the panels containing eucalyptus. These results were compared both to standard and the literature confirming the viability of the use to low value-added wood on the production of CLT panels.

Key words: Cross Laminated Timber (CLT). Visual classification. Ultrasound. Adhesives. wood reforestation.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figura 1. | Desdobro paralelo da tora de eucalipto | 16 |
| Figura 2. | Configuração das camadas dos painéis de CLT | 19 |
| Figura 3. | Painel CLT | 20 |
| Figura 4. | Gráfico de Evolução da Produção do CLT na Europa Central (1.000 m ³) | 21 |
| Figura 5. | Processamento industrial das tábuas | 22 |
| Figura 6. | Aplicação do Adesivo | 22 |
| Figura 7. | Prensagem dos Painéis CLT | 23 |
| Figura 8. | Recorte das Aberturas nos painéis CLT | 23 |
| Figura 9. | Ligação do Painel com piso utilizando conector metálico..... | 24 |
| Figura 10. | Ligação de Painel Parede com Painel Laje utilizando conector metálico | 25 |
| Figura 11. | Ligações entre Painéis Laje..... | 25 |
| Figura 12. | Ligação entre Painéis Laje | 26 |
| Figura 13. | Instalações elétricas através de rasgos no Painel..... | 26 |
| Figura 14. | Instalações elétricas e hidráulicas sem rasgos no Painel..... | 27 |
| Figura 15. | Instalações elétricas e hidráulicas em Painéis de Laje e Parede | 27 |
| Figura 16. | Transporte dos Painéis CLT | 28 |
| Figura 17. | Transporte dos Painéis CLT | 28 |
| Figura 18. | Transporte de blocos pré-fabricados com CLT | 29 |
| Figura 19. | Construção utilizando painéis CLT | 30 |
| Figura 20. | Edificação construída com CLT | 31 |
| Figura 21. | Interior de uma edificação utilizando CLT..... | 31 |
| Figura 22. | Laje de cobertura executada em CLT..... | 32 |
| Figura 23. | Edifício Stadthaus em Londres: Vista interna durante a construção e vista externa do edifício acabado | 32 |
| Figura 24. | Aplicação de força para teste de flexão no sentido longitudinal e transversal ao eixo..... | 33 |
| Figura 25. | Ensaio de flexão em 4 pontos (<i>third-point loading</i>)..... | 34 |
| Figura 26. | Ruptura do painel CLT no alinhamento dos nós..... | 36 |
| Figura 27. | Ruptura do painel CLT no alinhamento dos nós..... | 37 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| Figura 28. | Localização da madeira Juvenil na tora..... | 46 |
| Figura 29. | Rachadura da peça de medula de eucalipto | 53 |
| Figura 30. | Classificação visual das tábuas de Pinus | 54 |
| Figura 31. | Medição de Ultrassom nas peças de eucalipto | 55 |
| Figura 32. | Medidor de Umidade da madeira..... | 56 |
| Figura 33. | Corpo de prova para a realização do ensaio de cisalhamento da linha de cola (dimensões em mm) | 58 |
| Figura 34. | Orientação das fibras dos corpos de prova para a realização do ensaio de cisalhamento da linha de cola | 59 |
| Figura 35. | Aparato Elaborado para Realizar os testes de colagem..... | 60 |
| Figura 36. | Aparato elaborado para prensagem dos corpos de prova..... | 61 |
| Figura 37. | Preparação do adesivo Ureia-formaldeído com adição de corante | 61 |
| Figura 38. | Teste de cisalhamento..... | 62 |
| Figura 39. | Separação por cores das tabuas de pinus e eucalipto de acordo com o módulo de elasticidade | 64 |
| Figura 40. | Pesagem do Adesivo..... | 64 |
| Figura 41. | Montagem do Painel CLT | 65 |
| Figura 42. | Montagem do Painel CLT | 65 |
| Figura 43. | Aplicação do Adesivo MUF com espátula | 66 |
| Figura 44. | Preparação para prensagem do Painel CLT | 67 |
| Figura 45. | Prensagem do Painel CLT..... | 67 |
| Figura 46. | Painel CLT no equipamento para teste de flexão e ruptura..... | 68 |
| Figura 47. | Ensaio de flexão (4 pontos) | 69 |
| Figura 48. | Relação entre o MOE estático e MOE dinâmico do eucalipto | 71 |
| Figura 49. | Relação entre o Módulo de elasticidade estático e dinâmico para o <i>Pinus spp</i> | 73 |
| Figura 50. | Gráfico dos Resultados das colagens com adesivo MUF, nos sentido paralelo e perpendicular às fibras | 75 |
| Figura 51. | Gráfico com Resultados das colagens com adesivo UF, nos sentidos paralelo e perpendicular às fibras | 75 |
| Figura 52. | Gráfico com os resultados das colagens dos corpos de prova com adesivo MUF..... | 77 |
| Figura 53. | Gráfico com os resultados das colagens dos corpos de prova com adesivo UF | 78 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| Figura 54. | Corpos de prova com adesivo MUF | 78 |
| Figura 55. | Corpos de prova com adesivo UF | 78 |
| Figura 56. | Resultados de Módulo de Elasticidade (MOE) dos Painéis CLT | 81 |
| Figura 57. | Resultados do Módulo de Ruptura (MOR) dos Painéis CLT | 82 |
| Figura 58. | Painel PPP grupo aleatório..... | 86 |
| Figura 59. | Painel PPP grupo 3, detalhe da ruptura no nó | 86 |
| Figura 60. | Painel PPP grupo 3 | 87 |
| Figura 61. | Painel do PPP do grupo 1, detalhe da falha na linha de cola | 88 |
| Figura 62. | Painel PEP grupo aleatório..... | 89 |
| Figura 63. | Painel PEP do grupo 3 | 90 |
| Figura 64. | Painel PEP do grupo 2 | 90 |
| Figura 65. | Painel EPE do grupo aleatório..... | 91 |
| Figura 66. | Painel EPE do grupo 2 | 91 |
| Figura 67. | Painel EPE do grupo 2 | 92 |
| Figura 68. | Painel EPE do grupo 1 | 92 |
| Figura 69. | Painel EPE do grupo 1 | 93 |
| Figura 70. | Painel EEE grupo aleatório..... | 94 |
| Figura 71. | Painel EEE grupo 3 | 94 |
| Figura 72. | Painel EEE grupo 1 | 95 |

LISTA DE QUADROS

| | | |
|-------------------|---|----|
| Quadro 1. | Valores para módulo de Ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) | 35 |
| Quadro 2. | Valores de Kmod3 para coníferas..... | 42 |
| Quadro 3. | Valores de Kmod3 para Folhosas..... | 42 |
| Quadro 4. | Condições para Classificação Visual de Peças Estruturais de Madeira tipo pinus..... | 44 |
| Quadro 5. | Valores de umidades para Eucalipto e Pinus | 56 |
| Quadro 6. | Formação dos Painéis CLT de acordo com grupos de resultados de MOE dinâmico (valores em MPA)..... | 63 |
| Quadro 7. | Dados obtidos a partir da classificação visual da espécie <i>Pinus spp</i> | 70 |
| Quadro 8. | Dados obtidos de Módulo de Elasticidade Dinâmico e Módulo de Elasticidade Estático para o eucalipto | 71 |
| Quadro 9. | Dados obtidos de Módulo de Elasticidade Dinâmico e Módulo de Elasticidade Estático para o pinus | 72 |
| Quadro 10. | Resultados dos testes de cisalhamento nos corpos de prova colados no plano paralelo e perpendicular às fibras (MPa) | 74 |
| Quadro 11. | Análise visual dos testes de cisalhamento nos corpos de prova colados nos plano paralelo e perpendicular às fibras | 76 |
| Quadro 12. | Resultados dos Ensaios nos Painéis CLT | 80 |
| Quadro 13. | Resumo comparativo dos resultados do estudo com a revisão bibliográfica..... | 83 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------------|--|
| AITC | <i>American Institute of Timber Construction.</i> |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials.</i> |
| ANSI/APA PRG | <i>American National Standard Institute/ The Engineered Wood Association</i> |
| CLT | <i>Cross Laminated Timber.</i> |
| EPI | Emulsão Polímero Isocianato |
| MOE | Módulo de Elasticidade |
| MOR | Módulo de Ruptura |
| MUF | Melanina-ureia-formaldeído |
| NBR | Norma Brasileira Registrada |
| PUR | Poliuretanos |
| SPIB | <i>Southern Pine Inspection Bureau.</i> |
| UF | Ureia-formaldeído. |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 2 | ESTADO DA ARTE | 18 |
| | 2.1 SISTEMA CONSTRUTIVO <i>CROSS LAMINATED TIMBER</i> OU CLT | 18 |
| | 2.1.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO | 21 |
| | 2.1.2 Conexões e Instalações no Sistema Estrutural CLT | 24 |
| | 2.1.3 QUALIDADE ARQUITETÔNICA | 30 |
| | 2.2 METODOLOGIA DE ENSAIO DOS PAINÉIS CLT | 33 |
| | 2.3 CLASSIFICAÇÃO VISUAL | 41 |
| | 2.4 CLASSIFICAÇÃO NÃO DESTRUTIVA POR ULTRASSOM | 44 |
| | 2.5 ADESIVOS | 47 |
| | 2.6 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRAFICA | 50 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 52 |
| | 3.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS PEÇAS DE EUCALIPTO E PINUS | 52 |
| | 3.2 CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA NÃO DESTRUTIVA DAS PEÇAS DE EUCALIPTO E PINUS | 55 |
| | 3.2.1 Ensaio de ultrassom | 55 |
| | 3.2.2 Medição de Umidade | 55 |
| | 3.2.3 Classificação estrutural mecânica não-destrutiva das peças de pinus e eucalipto | 56 |
| | 3.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ADESÃO EM TESTE EM CORPOS DE PROVA | 57 |
| | 3.3.1 Elaboração dos Corpos de Prova | 57 |
| | 3.3.2 Teste de Cisalhamento nos Corpos de Prova | 62 |
| | 3.3.3 Elaboração dos Painéis CLT | 63 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 70 |
| | 4.1 RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS PEÇAS DA MEDULA DO <i>EUCALIPTO GRANDIS</i> E <i>PINUS SPP</i> | 70 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 4.2 | RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS PEÇAS DA MEDULA DO EUCALIPTO | 70 |
| 4.3 | RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS PEÇAS DE PINUS..... | 71 |
| 4.4 | RESULTADO DOS TESTES DE CISALHAMENTO NOS CORPOS DE PROVA | 73 |
| 4.5 | RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS PAINÉIS | 79 |
| 4.6 | MODOS DE RUPTURA NOS PAINÉIS CLT | 85 |
| 4.6.1 | Painéis Pinus/Pinus/Pinus..... | 85 |
| 4.6.2 | Painéis Pinus/Eucalipto/Pinus | 88 |
| 4.6.3 | Painéis Eucalipto/Pinus/Eucalipto | 91 |
| 4.6.4 | Painéis Eucalipto/Eucalipto/Eucalipto..... | 93 |
| 5 | CONCLUSÃO | 96 |
| 6 | POSSIBILIDADE DE FUTUROS ESTUDOS..... | 99 |
| | REFERÊNCIAS..... | 100 |

1 INTRODUÇÃO

A madeira proveniente de floresta plantada de pinus e eucalipto como matéria prima para construção civil, normalmente é subutilizada no Brasil, destinada principalmente como formas temporárias para estrutura de concreto de vigas, lajes e como escoras.

O estado do Paraná é um dos principais produtores florestais do país, sendo o município de Telemaco Borba maior centro de produção de florestas e produtos florestais no estado, segundo MOURA et al (2013). No município está instalada a fábrica Klabin de papel e celulose, que absorve grande parte da produção florestal local, no entanto, existe também uma cadeia produtiva de madeira serrada para fabricação de componentes, cabos de ferramentas e para construção civil.

Esta produção é realizada, via de regra, por empresas de base familiar, com processo rudimentar de industrialização e baixos rendimentos. Esta segunda transformação, bastante simplificada de tecnologia de processamento primário nestas serrarias, tem como consequência que, boa parte da matéria prima que entra na linha de produção sai na forma de rejeitos e produtos com baixo valor agregado.

Peças consideradas com baixo valor agregado por serrarias, são aquelas resultantes dos recortes de tábuas e a medula das espécies, ou a parte central do tronco. Estes recortes, peças com comprimento inferior a 120 cm, são em geral compostos por madeira de alta qualidade, oriundos de toras de 6m, que por razões de gestão da produção de madeira serrada, são destinados à produção de energia (lenha), segundo MOURA *et al* (2012). Para o estudo serão avaliados os recortes de pinus e medula de eucalipto.

A destinação destas peças com baixo valor agregado, para construção civil é praticamente inexistente, no caso da medula do eucalipto, parte central do tronco, este fato deve-se principalmente à baixa densidade e qualidades mecânicas e alta retração. O desdobro paralelo das toras de eucalipto faz com que a medula seja excluída na composição das tábuas, como demonstrado na figura 1.

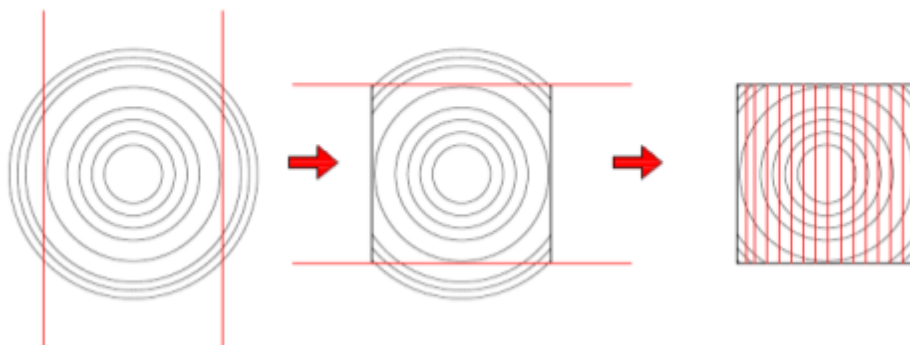


Figura 1. Desdobro paralelo da tora de eucalipto. Fonte: autor

Portanto, assim como os recortes de pinus, a medula de eucalipto é matéria prima destinada a se transformar em carvão e lenha. A possibilidade do aproveitamento deste material, medula de eucalipto e recortes de pinus na construção civil é uma forma de baixar custos de produção e agregar valor a esta matéria prima.

Como alternativa para utilização desta matéria prima subutilizada, encontra-se o sistema construtivo em madeira laminada colada cruzada ou *Cross Laminated Timber* (CLT). Este sistema construtivo primeiramente desenvolvido na Áustria e Alemanha em 1997 é composto por painéis estruturais, elaborados a partir da colagem de tábuas perpendicularmente uma a outra. O processo de fabricação de painéis CLT inclui a seleção da madeira, agrupamento da madeira em classes, usinagem, aplicação do adesivo, prensagem e cortes de ajustes.

Um dos principais aspectos da fabricação dos painéis CLT é a qualidade da madeira empregada e a qualidade de colagem assim como o alto nível de industrialização e o fácil manejo no canteiro de obras. Neste contexto, a questão principal do estudo que pretende ser esclarecida é: é viável a utilização de madeira com baixo valor agregado, recortes de pinus e medula de eucalipto para confecção de painéis estruturais CLT?

Portanto este trabalho tem como objetivo principal:

- Estudar a viabilidade técnica de painéis CLT, fabricados com peças de pinus e medula de eucalipto, provenientes de florestas plantadas.

E como objetivos específicos:

- 1- Classificar visual e de forma mecânica não destrutiva, as peças de medula de eucalipto e as tábuas de pinus.
- 2- Avaliar a qualidade da colagem entre as espécies de *Pinus ssp* e *Eucalyptus grandis* (apenas peças provenientes da medula).
- 3- Realizar ensaios em corpos de prova de CLT segundo as normas brasileiras e internacionais.

2 ESTADO DA ARTE

2.1. SISTEMA CONSTRUTIVO *CROSS LAMINATED TIMBER* OU CLT

Os painéis de madeira laminada colada cruzada ou CLT (*Cross Laminated Timber*) são compostos por tábuas de madeira serrada coladas em camadas transversais, formando uma placa maciça com características estruturais. Tendo seu início na década de 1990 na Áustria e Alemanha, estes painéis têm sido empregados em vários tipos de construções, comerciais e residenciais, com estudos para utilização inclusive e cada vez mais em edifícios altos.

De acordo com *FPIInnovations* (2011) o CLT é parcialmente dirigido a construções energeticamente eficientes, devido às propriedades da madeira apresentarem bom desempenho no isolamento térmico, acústico e em face ao fogo. Apresentando baixo peso em relação ao aço e o concreto, construções que utilizam CLT necessitam de fundações menos robustas em comparação a construções convencionais, desta forma, o sistema construtivo torna-se mais competitivo economicamente. O CLT pode ser utilizado em construções de forma exclusiva, como estrutura e vedação, bem como em combinação com outros métodos construtivos como concreto e aço, principalmente em prédios de mais de 2 pavimentos.

Segundo RIVERA (2012), tradicionalmente os sistemas construtivos em madeira laminada colada dispõem as fibras orientadas em uma única direção, tanto em aplicações verticais como horizontais. A característica principal dos painéis de CLT é o bom desempenho em todas as direções, podendo ser considerado como elementos isotrópicos estruturais, pois são construídos por camadas sobrepostas de peças de madeira coladas em direções transversais com o objetivo de aumentar a rigidez e estabilidade dimensional.

Normalmente os painéis CLT são produzidos em camadas ímpares, entre 3 a 7 camadas, podendo ser produzidos em número par ou em maior número de camadas em alguns casos. Em configurações especiais duas camadas consecutivas podem ser coladas na mesma direção, produzindo uma camada dupla,

obtendo-se desta forma capacidades estruturais específicas, *FPIinnovations* (2011), como ilustra a figura 2.

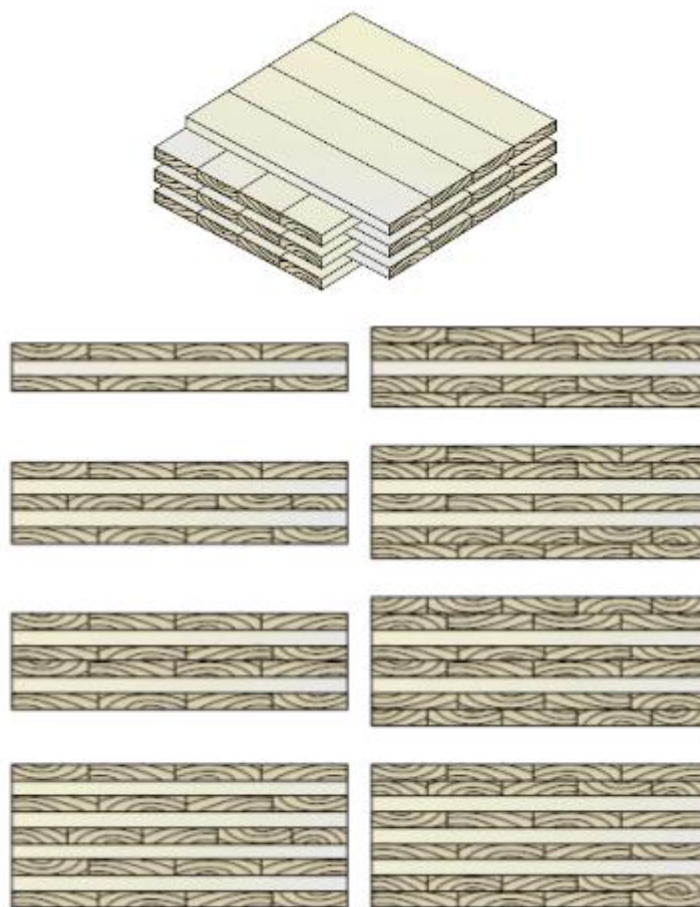


Figura 2. Configuração das camadas dos painéis de CLT. Fonte: *FPIinnovations* (2011) *CLT Handbook*.

A espessura final das peças utilizadas na fabricação dos painéis CLT não pode ser inferior a 16mm e não superior a 51mm, cuja a variação da espessura das peças fica entre 0,2 mm a 0,3 mm, para garantir a qualidade da linha de cola. A largura das tábuas utilizadas na composição dos painéis CLT, pode variar de 6 cm a 24 cm. As dimensões dos painéis sofrem limitações quanto ao transporte podendo ser fabricados com comprimento máximo de 18 m. As larguras dos painéis CLT podem variar entre 60 cm a 300 cm. Para compor painéis com dimensões superiores ao dos comprimentos das tábuas são utilizados *finger joint* para a junção de topo entre as tábuas, segundo *FPIinnovations* (2011).

A figura 3 mostra um painel CLT com 5 camadas coladas

transversalmente uma a outra e como se configura a disposição destes painéis em uma composição de laje ou piso. A indicação das flexas na ilustração demonstra a direção das tábuas longitudinais, as quais são mais soliciadas estruturalmente indicando desta forma os apoios destes painéis.

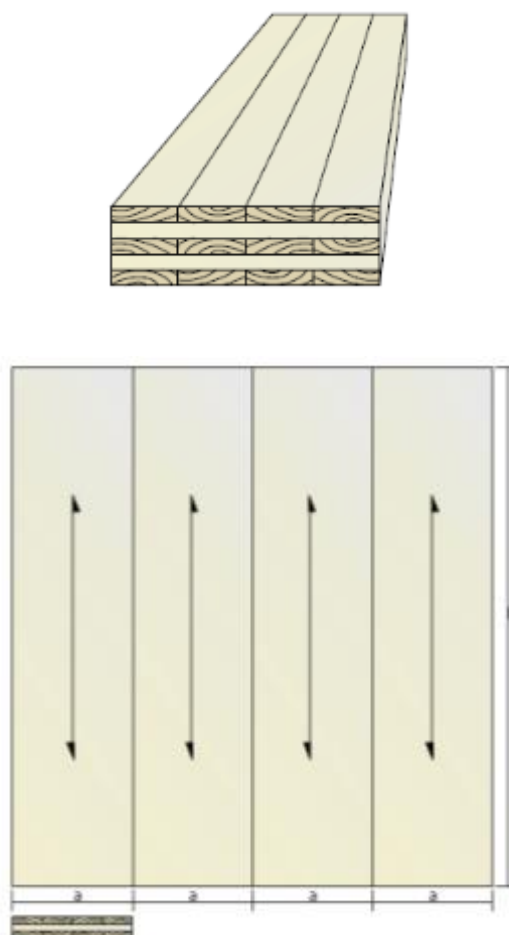


Figura 3. Painel CLT. Fonte: *FPIinnovations (2011) CLT Handbook*.

Por se tratar de um sistema construtivo pré-fabricado, com fácil trabalhabilidade e boa relação densidade/resistência no sentido axial, possibilita soluções simples e eficientes para conexões entre diferentes elementos, segundo PASSARELLI (2012). Este desenvolvimento tecnológico de matérias que agregam qualidade construtiva à madeira, como adesivos químicos e usinagem computadorizada, geram ganho de produtividade e desempenho. Por estes fatores mencionados, o CLT encontra-se em crescente difusão no hemisfério Norte e na

Europa Central como mostram os dados da figura 4.

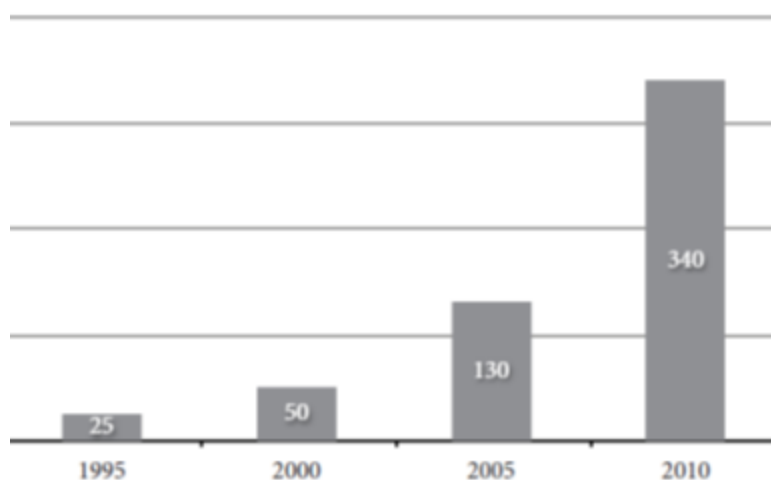


Figura 4. Gráfico de Evolução da Produção do CLT na Europa Central (1.000 m³). Fonte: SCHICKHOFER (2010) apud PASSARELLI (2012).

A produção de CLT na Europa Central, segundo PASSARELLI (2012) já é a segunda mais importante dentre os produtos beneficiados de madeira, apresentando crescimento exponencial nos últimos 10 anos. Estima-se que em 2015 sua produção alcance 1 milhão de metros cúbicos, somente no continente europeu.

2.1.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO

O processo para a produção dos painéis CLT inclui várias etapas. Inicialmente é realizada uma classificação visual e mecânica não destrutiva das peças de madeira que serão utilizadas na confecção dos painéis (figura 5). Após estas classificações as peças são aparelhadas e aplainadas removendo desta forma uma fina camada que abre os poros da madeira para a aplicação do adesivo (figura 6).



Figura 5. Processamento industrial das tábuas. Fonte: *FPIinnovations* (2011) *CLT Handbook*.



Figura 6. Aplicação do Adesivo. Fonte: *FPIinnovations* (2011) *CLT Handbook*.

O tempo de montagem dos painéis depende do tipo de adesivo utilizado, da prensagem, do corte dos painéis, ajustes de esquadrias e encaixes, (figura 8) e aparelhamento da superfície. A prensagem dos painéis CLT, pode ser feita de duas formas, pressão a vácuo e pressão hidráulica estimada em torno de 1MPa (figura 7).



Figura 7. Prensagem dos Painéis CLT. Fonte: *FPIInnovations (2011) CLT Handbook*.



Figura 8. Recorte das Aberturas nos painéis CLT. Fonte: *FPIInnovations (2011) CLT Handbook*.

O bom desempenho na fabricação dos painéis CLT, segundo a FPIINOVATIONS (2011) está na qualidade da madeira utilizada e controle dos parâmetros que tem impacto na qualidade da linha de cola. A umidade das peças de madeira no momento da produção deve permanecer em torno de 12%, para evitar variações dimensionais, retração e expansão da madeira com maior umidade.

A norma ANSI/APA PRG 320 (2012) permite que combinações de diferentes espécies de madeira possam compor um painel de CLT, no entanto, cada camada deve ser composta com somente uma espécie, para evitar diferenças nas propriedades mecânicas e físicas. As peças de madeira utilizadas na fabricação dos painéis CLT devem ser classificadas visualmente, não só pelo caráter estético para

melhor comercialização mas também para eliminar defeitos que possam influenciar na qualidade estrutural do painel. Defeitos como arqueamento, curvatura, torcimento da peça e esmoado podem afetar a qualidade da colagem e a resistência na linha de cola, portanto devem ser evitados.

2.1.2. Conexões e Instalações no Sistema Estrutural CLT.

Os encaixes entre os painéis CLT são executados através de ligações diretas parafusadas em união entre painéis de laje e entre painéis de parede e laje, como ilustram as figuras 9, 10, 11 e 12.

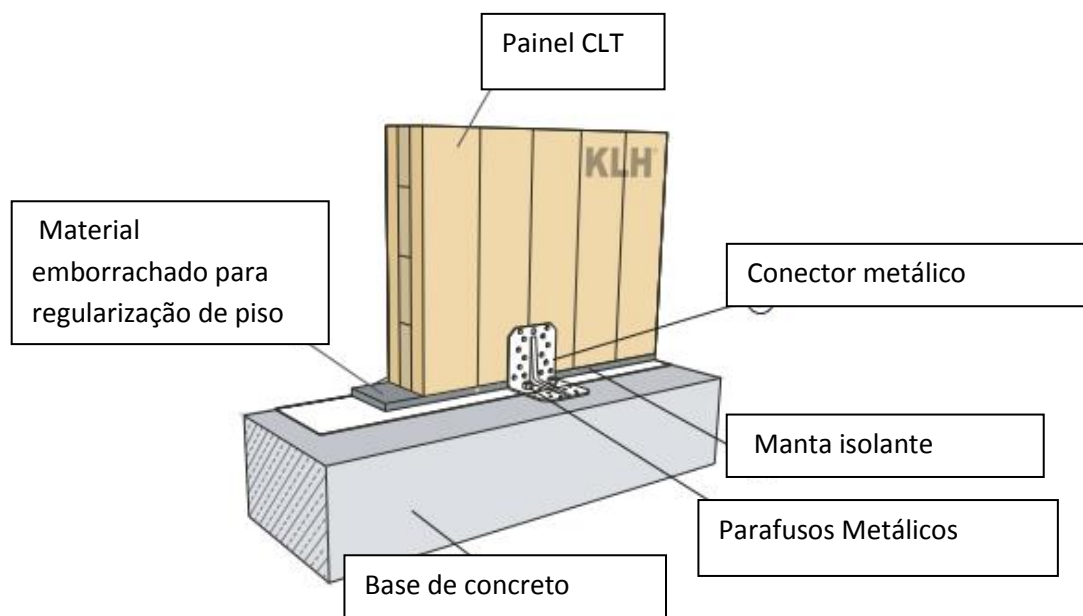


Figura 9. Ligação do Painel com piso utilizando conector metálico. Fonte: KLH *Massivholz GmbH* (2011) *Component Catalogue for CLT Structures*.

Na figura 9 a ligação é entre um painel parede e o piso, onde entre os dois elementos é colocada uma manta isolante com objetivo de afastar a umidade do painel e aumentar a estanqueidade da construção. Outro elemento que é colocado entre o painel parede e o piso é um material emborrachado que faz o ajuste da regularização do piso evitando pequenas inclinações do painel.

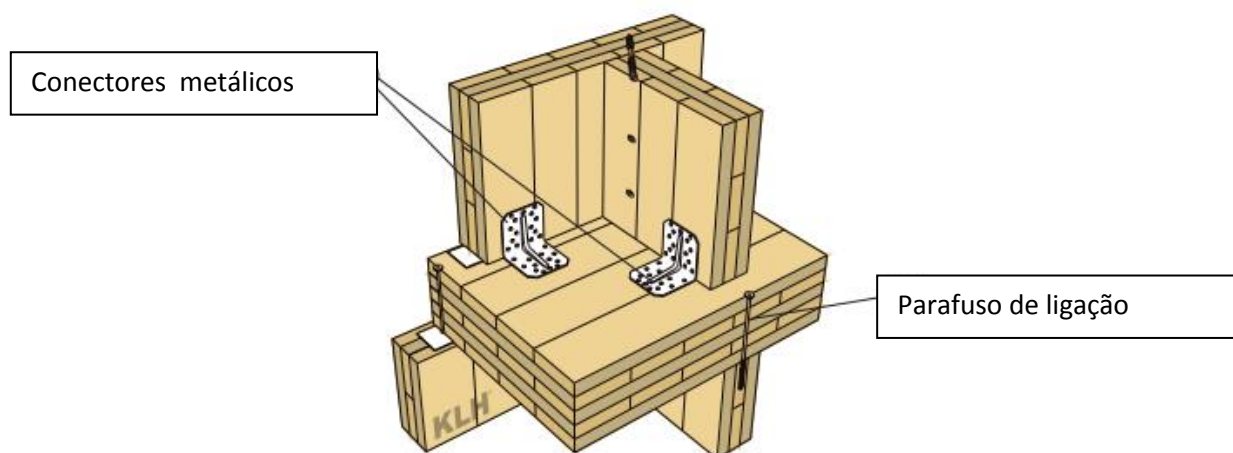


Figura 10. Ligação de Painel Parede com Painel Laje utilizando conector metálico. Fonte: KLH Massivholz GmbH (2011) *Component Catalogue for CLT Structures*.

Na figura 10 observa-se a ligação entre painel parede e painel laje, que pode ser feita através de conectores metálicos que são parafusados nos painéis como também através de parafusos de ligação. Peças de ligação elaboradas a partir de placas de OSB (*Oriented Strand Board*) ou madeira maciça são solidarizadas por parafusos, como ilustra a figura 11, na junção entre dois painéis laje. Outra forma de ligação entre painéis laje é por intermédio de parafusos de ligação (figura 11) na emenda dos painéis.

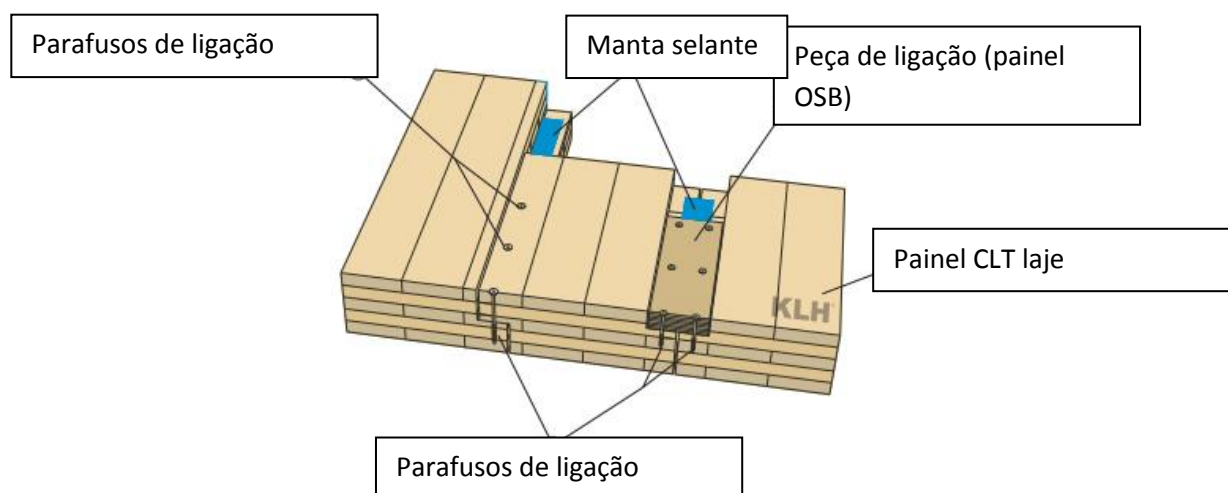


Figura 11. Ligações entre Painéis Laje. Fonte: KLH Massivholz GmbH (2011) *Component Catalogue for CLT Structures*.

Assim como nas ligações parafusadas entre painel laje da figura 11, a figura 12 demonstra o mesmo tipo de ligação.



Figura 12. Ligação entre Painéis Laje. Fonte: *FPIinnovations* (2011) CLT Handbook.

As instalações elétricas e hidráulicas podem ser executadas de duas formas. Na figura 13, o instalação da tubulação é feita através de rasgos nos painéis CLT. Para tubulações com maiores diâmetros, as intalações são executadas em frente aos painéis e recobertas com placas de gesso acartonado, como mostra a figura 14.



Figura 13. Instalações elétricas através de rasgos no Painel. Fonte: *KLH Massivholz GmbH* (2011) *Component Catalogue for CLT Structures*.



Figura 14. Instalações elétricas e hidráulicas sem rasgos no Painel. Fonte: *KLH Massivholz GmbH (2011) Component Catalogue for CLT Structures.*

De acordo com JORGE (2013) sempre que as paredes ou pisos são revestidos, as instalações técnicas são realizadas de forma usual, no entanto se há a necessidade de abertura de rasgos estes devem ser abertos na direção estrutural principal deixando-se uma distância mínima de segurança dos apoios. Da mesma forma segundo *KLH Massivholz GmbH (2011)*, Instalações executadas com recortes em painéis laje devem ser feitas na direção da flexão dos painéis, como mostra a figura 15.

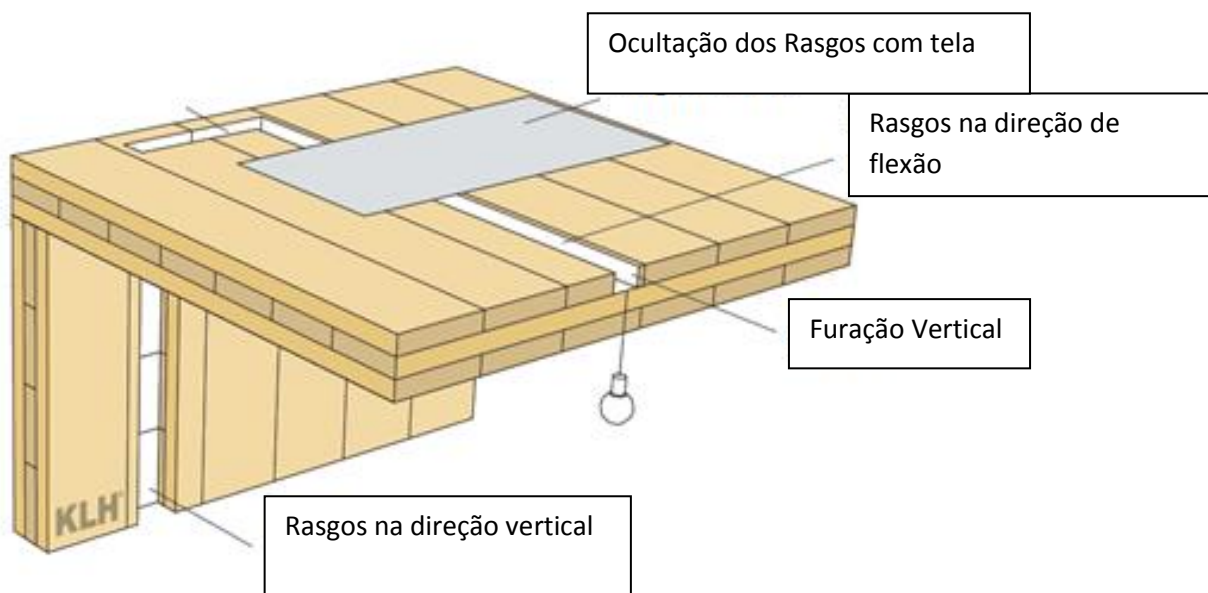


Figura 15. Instalações elétricas e hidráulicas em Painéis de Laje e Parede. Fonte: *KLH Massivholz GmbH (2011) Component Catalogue for CLT Structures.*

As aberturas para os vãos, portas e janelas, assim como os recortes nos painéis para instalações hidráulicas e elétricas são executadas em fábrica de acordo com os projetos arquitetônicos, estruturais e complementares. Os painéis de CLT, após produzidos em fábrica, são transportados até o canteiro e a instalação é feita por meio de guindastes, içando os painéis e colocando-os em seus lugares, como mostra a figuras 4. A mão de obra no canteiro de obra é necessária na fixação dos elementos à construção através de conectores metálicos e parafusos auto-atarrachantes, ou seja, uma construção com pouco tempo de trabalho em canteiro de obra e uma construção de alta qualidade, com elevado isolamento térmico e fechamento hermético (JORGE 2013).



Figura 16. Transporte dos Painéis CLT. Fonte: *FPInnovations (2011) CLT Handbook*.



Figura 17. Transporte dos Painéis CLT. Fonte: *Finnforest Merk GmbH (2010)*.

Os painéis podem ser transportados de forma individual e também em blocos unitários pré-fabricados, com dimensões de containeres (figura 18), os quais são fabricados inteiramente em ambiente industrial, com todas as instalações prontas. Estes blocos pré-fabricados são transportados diretamente ao local da obra, desta forma reduzindo ainda mais o tempo de montagem da edificação utilizando o sistema estrutural CLT. A figura 19 ilustra uma construção em fase de montagem executada em CLT.



Figura 18. Transporte de blocos pré-fabricados com CLT. Fonte: *FPInnovations* (2011) *CLT Handbook*.



Figura 19. Construção utilizando painéis CLT. Fonte: *FPIinnovations* (2011) *CLT Handbook*.

2.1.3. QUALIDADE ARQUITETÔNICA

O sistema construtivo CLT apresenta vantagens arquitetônicas em relação aos outros sistemas construtivos pré-fabricados. Diferente dos sistemas construtivos que têm como regra as dimensões modulares de placas de revestimento, com por exemplo, os sistemas construtivos *wood frame* e *steel frame*, o CLT é produzido de acordo com as medidas do projeto arquitetônico sem uma modulação prévia (figura 20, 22).

Segundo FPIINNOVATIONS (2011) os painéis CLT podem ser utilizados de forma aparente em ambientes internos, como mostra a figura 21. Para esta utilização dos painéis de forma aparente, as tábuas que compõem estes painéis, são classificadas de forma que apresentem menos nós para se obter maior qualidade estética. No entanto para uso externo os painéis CLT devem ser protegidos por revestimentos protetores contra a umidade.



Figura 20. Edificação construída com CLT. Fonte: *FPIinnovations* (2011) *CLT Handbook*.



Figura 21. Interior de uma edificação utilizando CLT. Fonte: *FPIinnovations* (2011) *CLT Handbook*.



Figura 22. Laje de cobertura executada em CLT. Fonte: *FPIInnovations* (2011) *CLT Handbook*.

Um exemplo de construção integral em CLT, é o edifício *Murray Groove Stadthaus*, em Londres, figura 23. Com nove pavimentos, esta construção multi-familiar foi realizada em 28 dias por apenas 4 carpinteiros e um operador de guindastes, segundo *PASSARELLI* (2012).



Figura 23. Edifício Stadthaus em Londres: Vista interna durante a construção e vista externa do edifício acabado. Fonte: <http://www.waughthistleton.com>

2.2 METODOLOGIA DE ENSAIO DOS PAINÉIS CLT.

A norma ANSI/APA PRG 320 (2012), estipula valores mínimos de esforços para a capacidade estrutural dos painéis CLT, que devem ser obtidos através de testes mecânicos em corpos de prova. São testados a rigidez e resistência a flexão, cisalhamento, compressão e tração. Os testes de resistência à flexão são realizados em duas direções, paralelo e perpendicular à maior direção de força, como ilustra a figura 24.



Figura 24. Aplicação de força para teste de flexão no sentido longitudinal e transversal ao eixo. Fonte: *FPIinnovations (2011) CLT Handbook*.

Os testes de flexão são realizados por “cutelo”, em que a força é aplicada tanto perpendicularmente quanto no sentido transversal à face do painel, de acordo com a norma ASTM D 198 (2009), pelo método de carregamento em quatro pontos (*third-point loading*), como demonstra a figura 25. O corpo de prova deve ter largura maior que 30,5 cm e comprimento 30 vezes a altura da peça, ou seja, se for utilizada madeira serrada com 2 cm de espessura para um painel com 3 camadas, o comprimento total para corpo de prova será de 180cm.

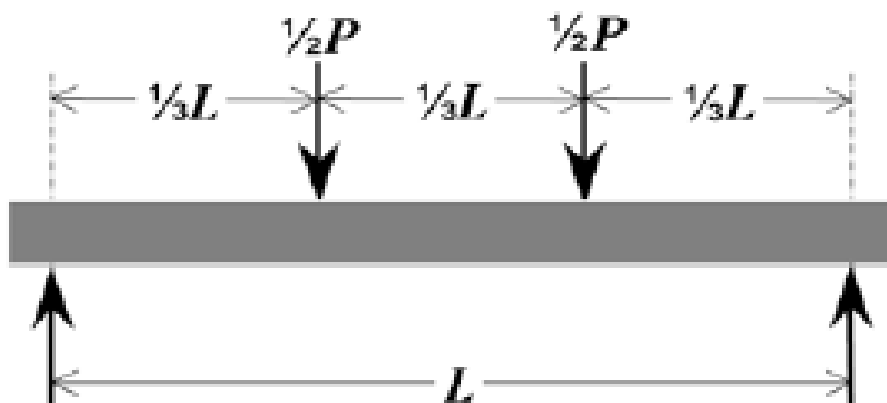


Figura 25. Ensaio de flexão em 4 pontos (*third-point loading*). Fonte: ASTM D198 (2009).

Por meio de valores obtidos nos ensaios de flexão é determinado o módulo de elasticidade aparente MOE através da equação (1).

$$MOE = \frac{23F \cdot L^3}{108 \cdot b h^3 \cdot \Delta V} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

MOE = módulo de elasticidade (MPa);

F = Carga (N);

L = vão livre (mm);

ΔV = deslocamento ou flecha final (mm)

b = largura da seção transversal (mm).

h = altura da seção transversal (mm).

O Módulo de ruptura, (MOR), segundo a ASTM D 198 (2009) e NBR 7190 (1997) é a medida da máxima capacidade de carga de uma peça em flexão. O Cálculo do MOR para Carregamento pelo método de 4 pontos é realizado através da equação (2):

$$MOR = \frac{P_{max} L}{b \cdot h^2} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

MOR: Módulo de ruptura
 P: Força máxima aplicada
 L: Vão livre
 b: base
 h: altura

A norma ANSI/APA PRG 320 (2012), determina valores para módulo de elasticidade e módulo de ruptura para painéis constituídos com espécies canadenses e americanas. Estas espécies são avaliadas através de classificação tanto visual como de forma mecânica (destrutivo e não destrutivo), obtendo-se também valores de compressão e cisalhamento, nas duas direções das fibras, paralelo e perpendicular ao eixo do painel.

| Espécies de madeira | MOR (MPa) | MOE (MPa) |
|---------------------|-----------|-----------|
| E1 | 28,2 | 11.700 |
| E2 | 23,9 | 10.300 |
| E3 | 17,4 | 8.300 |
| V1 | 10 | 11.000 |
| V2 | 11,8 | 9.500 |

Quadro 1. Valores para módulo de Ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE). Fonte: ANSI/APA PRG 320 (2012).

Os valores mínimos de referência, segundo a norma ANSI/APA PRG 320 (2012) para resultados obtidos em módulos de ruptura e módulo de elasticidade para painéis CLT, fabricados com espécies *Spruce-pine-fir*, *Douglas-fir-Larch* e *Eastern Softwoods* classificadas visual e mecânicamente não destrutiva (E) e somente classificadas visualmente (V), são observados no quadro 1. Estes valores são referentes a esforços de cargas aplicados no sentido longitudinal do painel.

A diferença é expressiva para módulo de ruptura entre as peças que são classificadas apenas visualmente V1 (10MPa), para as que são classificadas também de forma não destrutiva E1 (28,2 MPa) para a mesma espécie. No entanto esta diferença é baixa em relação ao módulo de elasticidade, 11.000 MPa para V1 e 11.700MPa para E1.

O estudo desenvolvido por CONCU *et al* (2014), analisa a possibilidade do uso de uma madeira de pinus, comum na região da Itália, que

apresenta baixas propriedades mecânicas e estruturais, para fabricação de painéis CLT. Para esse estudo os autores realizaram uma classificação visual das peças, identificando e localizando os nós contidos nas peças, assim como, classificação não destrutiva por ultrassom, obtendo resultados médios de MOE dinâmico de 8.380 MPa. A densidade médias dessas peças de pinus foi de 0,49 g/cm³.

Neste estudo foram fabricados 15 painéis CLT com 5 camadas, 3 longitudinais utilizando peças com melhores valores de classificação e com menos defeitos e 2 transversais com peças com menores valores de classificação não destrutiva e com maior numero de nós. Os resultados que estes autores obtiveram nos ensaios de flexão e ruptura realizados nos painéis CLT, foram de 7.913 MPa para módulo de elasticidade e 26,1 MPa para módulo de ruptura. Estes valores, os autores acreditam que seriam maiores se não houvesse a incidencia de nós nas tábuas, pois o colapso dos painéis correspondeu ao alinhamento dos nós, como mostra as figuras 26 e 27.



Figura 26. Ruptura do painel CLT no alinhamento dos nós. Fonte: CONCU *et al* (2013).



Figura 27. Ruptura do painel CLT no alinhamento dos nós. Fonte: CONCU *et al* (2013).

SIGRIST *et al* (2014), desenvolveram um estudo utilizando recortes e peças de madeira com baixa classificação não destrutiva (flexão) e visual, da espécie australiana *Pinus radiata*, na composição de painéis CLT. Estas peças sem classificação mínima para uso estrutural de acordo com as normas europeias compuseram 70 painéis CLT, em diferentes posicionamentos de camadas, com o objetivo de tentar igualar aos requisitos de resistência e de rigidez do CLT europeu, que utilizada madeiras com classificação C24 e C16. Para elaboração destes painéis CLT foram determinados 4 grupos diferentes para a espécie *Pinus radiata*, provenientes de diferentes regiões do tronco e selecionadas através de classificação visual e não destrutiva.

Destes 4 grupos de peças, 2 tipos não estruturais foram utilizados, um sem classificação, com valores médios de MOE 7.700 MPa e outro classificado visualmente, que eliminou os maiores defeitos como nós e rachaduras alcançando valores médios de 12.000 MPa para Módulo de elasticidade. Os outro dois tipos de grupo, compostos por peças provenientes de regiões mais densas do tronco, denominada de MGP12 apresentaram valores médios de 35.000 MPa para MOE, para peças classificadas visual e mecanicamente e valores médios de 27.000 MPa para peças não classificadas. Foram elaborados painéis CLT com 3 camadas, 5 camadas e com 7 camadas.

Os valores alcançados neste estudo para painéis com 3 camadas compostos de peças não estruturais, da espécie *Pinus radiata* foi de 25,5 MPa para módulo de ruptura e 6.251 MPa para módulo de elasticidade. Estes valores aumentam para 35,4 MPa para módulo de ruptura e 8.066 MPa para módulo de elasticidade, com utilização destas mesmas peças, porém classificadas visualmente.

Os melhores resultados obtidos foram para as os painéis compostos com peças de madeira, classificadas visual e mecanicamente, denominadas de MGP12, com valores de 53,1 MPa para módulo de ruptura e 12.567 MPa para módulo de elasticidade. Neste estudo os autores concluíram que peças da espécie *Pinus radiata* consideradas não estruturais provenientes de regiões menos densas e sem um processo de classificação podem ser utilizadas, porém somente nas camadas transversais dos painéis, que são as menos solicitadas mecanicamente.

WANG *et al* (2014) realizaram testes mecânicos em painéis CLT combinando espécies diferentes. Foram utilizados três espécies, *Douglas fir*, *Pinus radiata* e *Populus euroamericana*, com densidades de 0,47, 0,45 e 0,41 g/cm³ respectivamente. Os defeitos encontrados nas peças das espécies *Populus euroamericana* e na *Douglas fir* foram retirados e para obtenção dos comprimentos necessários, estas peças foram unidas através de *finger joint*. Somente as peças de *Pinus radiata* puderam ser usadas sem *finger joint*, pois apresentaram comprimento suficiente mesmo após a retirada dos defeitos.

Foram fabricados 5 tipos de combinações de painéis CLT com 3 camadas utilizando adesivo poliuretano (PUR), com dimensões de 2,1 m de comprimento por 1 m de largura. Destes 5 tipos de painéis, 3 foram fabricados usando a espécie *Populus euroamericana* na camada transversal, dois tipos com espécies *Pinus radiata* e *Douglas fir* nas camadas longitudinais e um inteiramente fabricado com esta espécie. As outras combinações foram dois tipos inteiramente elaborados com as espécies *Pinus radiata* e *Douglas fir*.

Os valores mais expressivos obtidos por WANG *et al* (2014) nestes ensaios de flexão realizados em painéis CLT foram de 44,5 MPa para módulo de ruptura nos painéis elaborados inteiramente de *Pinus radiata* e 8.690 MPa para módulo de elasticidade para os painéis elaborados somente com a espécie *Douglas*

fir. Os painéis compostos inteiramente pela espécie menos densa, *Populus euroamericano* mostram resultados de 41,6 MPa para módulo de ruptura e 5.970 MPa para módulo de elasticidade.

Os valores menores foram observados nos painéis compostos pelas espécies *Douglas fir* nas camadas longitudinais e *Populus euroamericano* na camada transversal, 31,5 MPa para MOR e 8.070 MPa para MOE. Em comparação aos resultados encontrados no painéis elaborados somente com *Douglas fir* (34,7 MPa para MOR e 8.690 MPa para MOE), o que se percebe é que esta espécie menos densa (*Populus euroamericano*) na camada central fez com que o painel se tornasse menos resistente e menos rígido. Mesmo resultado observado para as combinações contendo *Pinus radiata* com *Populus euroamericano* na camada transversal (41,23 MPa para MOR e 6.210 MPa para MOE) em comparação com os painéis elaborados somente com *Pinus radiata* (44,5 MPa para MOR e 6.350 MPa para MOE).

Neste estudo WANG et al (2014) observaram que as falhas ocorriam nas peças longitudinais que continham *finger joint*. Os maiores resultados de MOR foram observados nos painéis elaborados com peças sem *finger joint*, concluindo que este tipo de ligação realmente diminui a resistência dos painéis.

FLAIG et al (2014) realizaram estudo que consistiu em testes de flexão e ruptura realizados em vigas CLT com e sem *finger joint* utilizando adesivo MUF. Este autores também realizaram uma simulação computadorizada com seis tipos diferentes de vigas CLT variando o número de camadas e a largura das tábuas. Os resultados dos testes de flexão mostraram valores médios para MOR com madeira mais densa (0,45 g/cm³) e sem *finger joint* de 40 MPa para MOR e 12.800 MPa para MOE. Para madeira menos densa (0,40 g/cm³), os resultados obtidos por FLAIG et al (2014) foram de 32 MPa para módulo de ruptura e 10.000 MPa para módulo de elasticidade. Ou seja a densidade exerce papel preponderante no comportamento mecânico do painel.

Nas vigas CLT formadas por peças unidas com *finger joint* observaram-se falhas nestas ligações em 21% dos testes realizados com madeira mais densa. Nas vigas CLT formadas com peças menos densas a falha na ligação

finger joint foi de 7%.

Nas simulações por computador realizadas por FLAIG *et al* (2014), das 362 vigas CLT produzidos com *finger joint*, 264 resultaram em falhas nestas ligações. De acordo com essa simulação, a resistência à flexão não depende somente do número de camadas longitudinais, mas também da largura das tábuas que compõe cada camada. Foram simuladas vigas CLT com 2 a 4 camadas longitudinais, assim como larguras entre 75 mm e 150 mm. Os resultados observados mostram que, quanto menores as larguras das tábuas e conseqüentemente maior o número destas peças nas camadas, maiores valores de resistência a flexão foram observados. Vigas CLT com 4 camadas longitudinais e 8 tabuas com largura de 75 mm, o valor observado nesta simulação foi de 31,7 MPa para MOR, nesta mesma configuração com tábuas de 150 mm o valor obtido foi de 28,2 MPa.

STEIGER *et al* (2011) realizou um estudo que retirava amostras de tiras de 30 cm de 42 painéis CLT com 3 camadas colados com adesivo MUF. Nas camadas externas foi utilizada madeira classe C24, com densidade de 0,42 g/cm³ e na camada interna, madeira classe C20 (0,39 g/cm³). Foram realizados testes de flexão não destrutivos, em um comparativo com a norma pertinente ANSI/APA 320 (2012) e os valores obtidos para módulo de elasticidade ficaram entre 12.000 MPa a 14.000 MPa.

Os autores ZHOU e CHUI (2014), realizaram testes de flexão em painéis CLT 3 camadas utilizando peças com 0,52 g/cm³ de densidade. Os valores obtidos para módulo de elasticidade médio foi de 10.500 MPa.

De acordo com os valores mínimos para projetos estruturais para painéis CLT editados pela norma ANSI/APA 320 (2012), que regulamenta os testes realizados em CLT, os resultados para módulo de elasticidade não devem ser menores que 8.300 MPa e para módulo de ruptura 10 MPa (Quadro 1). Estes valores são relativos a testes de flexão no sentido longitudinal, conforme a norma ASTM D198.

2.3 CLASSIFICAÇÃO VISUAL

A madeira como matéria prima para a construção civil, em países europeus e na América do Norte, é amplamente utilizada, mesmo apresentando um potencial produtivo muito abaixo dos países tropicais, devido ao crescimento lento das árvores provocado pelas baixas temperaturas. No Brasil, o solo e as condições climáticas favoráveis, luz e umidade, propiciam a formação de florestas em poucos anos, produzindo madeira em períodos muito inferiores aos daquele hemisfério.

A consequência do rápido crescimento para as espécies de coníferas provenientes de florestas plantadas é que apresentam baixa densidade e muitos nós. No caso das folhosas o crescimento acelerado apresenta retração excessiva o que ocasiona defeitos de secagem tais como empenamentos e fendilamentos, sendo estes defeitos mais severos na zona ao redor da medula que tem menor densidade. Segundo CARREIRA e DIAS (2005) é necessário realizar uma classificação visual nas peças de madeira antes de utilizá-las como componentes estruturais.

No estudo comparativo entre as espécies *Pinus elliottii* e o *Eucalipto grandis*, sobre densidade realizado por SERPA *et al* (2003), observaram-se maiores valores para o eucalipto, tanto na região da medula quanto aquela próxima à casca.

A norma ASTM D 245 (1993) (*Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber*) determina os critérios para a limitação dos defeitos descritos em todas as regras de classificação visual em vigor na América do Norte. Esta norma não fornece as regras de classificação, mas estabelece critérios de como medir os defeitos.

A norma brasileira NBR 7190 (1997), não abrange os procedimentos para a classificação estrutural de peças de madeira. No entanto a qualidade da madeira é levada em consideração para o dimensionamento estrutural, através da aplicação do coeficiente de modificação K_{mod3} . Este coeficiente afeta os valores de cálculo das propriedades da madeira em função da classe de carregamento da estrutura, da umidade admitida e do tipo de classificação realizada na peça, se somente visual ou realizada também de forma não destrutiva. Esta mesma norma,

distingue as coníferas entre densas e não-densas das folhosas (quadros 2 e 3).

Para as coníferas não é admitido o uso estrutural sem classificação, no entanto para as folhosas a utilização sem classificação é permitida, porém corrigindo-se os valores através do coeficiente de modificação K_{mod3} de 0,70. O maior valor de $K_{mod3} = 1,00$ é adotado para as folhosas classificadas visual e mecanicamente, as quais devem ser isentas de defeitos. O menor valor de $K_{mod3} = 0,30$ é empregado para as coníferas não-densas de categoria S3, classificadas somente de forma visual (quadro 2). Portanto, a variação dos valores é acentuada devido a classificação, assim como a diferença entre o emprego somente da classificação visual e da classificação visual em conjunto com a classificação mecânica.

| Classificação | Classe | Tipo de classificação | |
|--------------------|--------|-----------------------|-------------------|
| | | Apenas visual | Visual e mecânica |
| Densas (D) | SE-D | 0,70 | 0,90 |
| | S1-D | 0,60 | 0,80 |
| | S2-D | 0,50 | 0,70 |
| | S3-D | 0,40 | 0,60 |
| Não-Densas (ND) | SE-ND | 0,60 | 0,80 |
| | S1-ND | 0,50 | 0,70 |
| | S2-ND | 0,40 | 0,60 |
| | S3-ND | 0,30 | 0,50 |

Quadro 2. Valores de K_{mod3} para coníferas. Fonte: NBR 7190 (1997).

| Classe | Tipo de classificação | |
|--------|-----------------------|-------------------|
| | Apenas visual | Visual e mecânica |
| SE | 0,90 | 1,00 |
| S1 | 0,85 | 0,95 |
| S2 | 0,80 | 0,90 |
| S3 | 0,75 | 0,85 |

Quadro 3. Valores de K_{mod3} para Folhosas. Fonte: NBR 7190 (1997).

Segundo CARREIRA e DIAS (2005), as classes de densidades para a madeira são definidas em função da taxa de crescimento da mesma, que se refere à quantidade de anéis presentes em 2,5 cm de comprimento (uma polegada), medidos em uma linha radial representativa. Para ser considerada densa, a madeira deve apresentar seis ou mais anéis de crescimento, peças consideradas com média densidade apresentam quatro ou mais anéis de crescimento e com menos de quatro são consideradas com baixa densidade.

Ainda segundo este autor, a classificação visual é baseada na premissa de que as propriedades mecânicas de uma peça estrutural diferem das propriedades mecânicas de corpos-de-prova isento de defeitos, pelo fato da presença das características do crescimento da madeira, como por exemplo, os nós. Estes defeitos podem ser identificados através da classificação visual normatizada para selecionar a madeira em classes de qualidade.

O SPIB (*Southern Pine Inspection Bureau*), que regula as normas de qualidade para a indústria de *Southern Pine*, e nas quais se encontram o *Pinus spp*, estima que mais de 95% da produção industrial de pinus nos Estados Unidos é classificada e comercializada em conformidade com estas normas.

Segundo CANDIAN (2007) o método de classificação desenvolvido por CARREIRA e DIAS (2005) permitiu verificar que o método de classificação visual descrito nas regras do SPIB é adequado para ser aplicado na madeira proveniente de florestas de *Pinus spp* plantadas no Brasil.

Como a NBR 7190 (1997) não especifica a metodologia de classificação visual que deve ser empregada para o enquadramento das classes para as coníferas e folhosas, a utilização de outras referências como a norma ATSM D 245 (1993) torna-se importante. A norma recomenda a análise das quatro faces e as duas extremidades de cada peça.

O manual de classificação visual desenvolvido por MOURA *et al.* (2012) para uso estrutural da madeira da espécie pinus considera o comprimento das peças, a localização e natureza dos nós, o desvio de grã, os empenamentos e as fendas, sendo que, de acordo com a quantidade de defeitos observados é atribuído um nível de qualidade para as peças. Esta classificação visual diferencia

as peças em quatro classes: Estrutural especial (ES), Estrutural nº 1 (S1), Estrutural nº2 (S2) e Estrutural nº 3 (S3), quanto a densidade de anéis da madeira: Densa (D) e Não Densa (ND) (quadro 4).

| Defeitos | Classes | | | |
|--|--|--|--|--|
| | ES | S1 | S2 | S3 |
| Rachaduras | 60 cm | 60cm | 90 cm ou $\frac{1}{4}$ do comprimento da peça | $\frac{1}{6}$ do comprimento da peça, sem limitações se atravessar a largura da peça |
| Nós Cariado, Nó solto, Nó vazado e Nó de Gravata | Não admissível | Não admissível | $\frac{1}{3}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal) | $\frac{1}{2}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal) |
| Nó firme e Nó espora | $\frac{1}{6}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal) | $\frac{1}{4}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal) | $\frac{1}{3}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal) | $\frac{1}{2}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal) |
| Nó de quina | Não admissível | $\frac{1}{4}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal) | $\frac{1}{3}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal) | $\frac{1}{2}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal) |

Quadro 4. Condições para Classificação Visual de Peças Estruturais de Madeira tipo pinus.
Fonte: Moura *et al* (2012).

2.4 CLASSIFICAÇÃO NÃO DESTRUTIVA POR ULTRASSOM

Além da classificação visual e mecânica, outras técnicas não destrutivas podem ser aplicadas para identificação das propriedades físicas e mecânicas da madeira sem alterar suas capacidades de uso final, assim como o método de ultrassom, o emprego da vibração transversal e ondas de tensão.

De acordo com GORNIK e MATOS (2000), a técnica de avaliação não destrutiva ultrassom para a madeira, apresenta diversificada finalidade, permitindo desde a determinação da existência de nós, presença de ataque de micro-organismos ou insetos, direcionamento das fibras, decomposição, passando pela avaliação de elementos estruturais de madeira em uso, até a estimativa de parâmetros como módulo de elasticidade e ruptura.

Segundo OLIVEIRA (2001), a determinação das propriedades

mecânicas da madeira, usando propagação de ondas ultrassônicas é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade. Ainda de acordo com CANDIAN (2007) as ondas ultrassônicas são aplicadas na madeira, por meio do posicionamento de dois transdutores, sendo um transmissor e o outro receptor. O equipamento registra o tempo em microssegundos, como mostra a figura 6. Com este registro é possível determinar a velocidade de propagação da onda ultrassônica e o módulo de elasticidade dinâmico, a partir da Eq. (3).

$$MOEd = \rho_{12\%} \cdot v^2 \quad \text{Eq.(3)}$$

Onde:

MOEd= módulo de elasticidade dinâmico (10^{-6} MPa);

$\rho_{12\%}$ = densidade da madeira a 12% de umidade (g/cm^3);

v = velocidade da onda longitudinal (m/s).

Como a madeira é um material biológico e anisotrópico, possui características físicas que podem influenciar na propagação das ondas ultrassônicas. Segundo BARTHOLOMEU (2001), além das características físicas da madeira, variáveis como a dimensão da seção transversal, o comprimento da peça e o teor de umidade, também influenciam a velocidade da propagação do som. A densidade, influenciada diretamente pela umidade, diminui a velocidade de ultrassom alterando o valor do módulo de elasticidade dinâmico.

TARGA *et al* (2005) realizaram um estudo para determinação de módulo de elasticidade em corpos de prova elaborados a partir de 3 espécies de eucalipto através do método ultrassom em comparação com ensaios mecânicos convencionais de flexão. Os valores médios obtidos para módulo de elasticidade dinâmico foram de 24.000 MPa para o *Corymbia citriadora* ($1,00 \text{ g/cm}^3$), 17.000MPa para o *Eucaliptus grandis* ($0,62 \text{ g/cm}^3$) e 19.000MPa para o *Eucaliptus saligna* ($0,87 \text{ g/cm}^3$). Em comparação aos valores médios observados para módulo de elasticidade estático 22.000MPa, 15.300MPa e 15.200MPa, respectivamente, os resultados obtidos através do método ultrassom foram superiores.

Segundo TARGA *et al* (2005), conforme observado por outros

pesquisadores, o módulo de elasticidade dinâmico é sempre maior que o estático. Ainda segundo este estudo, a correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático foi de $R^2=0,87$ para o *Corymbia citriadora* e *Eucaliptus grandis*. Para a espécie *Eucaliptus saligna* esta correlação foi de $R^2=0,76$. Portanto, o que se pode concluir é que quanto maior a densidade da madeira, maior valor de módulo de elasticidade dinâmico observado.



Figura 28. Localização da madeira Juvenil na tora. Fonte: BALLARIN *et al* (2005).

BALLARIN *et al* (2005), realizaram um estudo que compara os valores médios de módulo de elasticidade dinâmico da madeira juvenil com a madeira adulta do *Pinus taeda* (figura 28), com densidades médias de $0,50 \text{ g/cm}^3$ e $0,60 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Foram elaborados corpos de prova que após os testes com ultrassom foram realizados ensaios convencionais destrutivos de compressão paralela as fibras. Os resultados observados para $\text{MOE}_{\text{dinâmico}}$ foram de 11.816 MPa para madeira juvenil e 17.914 MPa para a madeira adulta, já os resultados médios observados para os ensaios destrutivos foram de 8.418MPa para a madeira juvenil e 13.376 MPa para a madeira adulta.

Ainda de acordo com BALLARIN *et al* (2005) o coeficiente de relação entre os resultados dos testes mecânicos e dinâmicos, neste estudo foi de $R^2=0,89$. Considerando valores satisfatórios acima de $R^2=0,70$ permite concluir que a constante dinâmica obtida com ultrassom é uma boa estimadora para módulo de elasticidade. Em relação a presença de madeira juvenil os valores obtidos neste estudo demonstram que houve diminuição da resistência em todos os testes executados.

No entanto, a densidade, um dos fatores citados de influência na velocidade de ultrassom, tem uma interferência menor que a estrutura celular da madeira. Defeitos como, nós, rachaduras, desvio do grã e presença de medula diferenciam os resultados obtidos para módulo de elasticidade dinâmico. Segundo PUCCINI (2002) *apud* LORENZANI (2013) a velocidade média de propagação das ondas ultrassônicas decresceu no mesmo sentido em que as classificação visual decrescia em graus de qualidade, ou seja, peças com mais defeitos visuais tem uma velocidade de ondas menor.

2.5 ADESIVOS

Outro fator que altera a resistência dos painéis CLT é o tipo de adesivo utilizado na fabricação. A norma ANSI/APA PRG 320 (2012) requer que os adesivos utilizados para a fabricação dos painéis sejam regulamentados pela norma AITC 405, no entanto somente para condições de uso interno ou seco. Os adesivos utilizados com mais sucesso no CLT são do tipo Fenólico: Fenol-resorcinol-formaldeído, Emulsão Polímero Isocianato (EPI) e os Poliuretanos (PUR), no entanto como apresentavam valores de mercado elevados, a utilização de adesivos como a melanina-uréia-formaldeído, mais acessíveis economicamente, tornam-se mais viáveis para fabricação do CLT com madeira de baixo valor agregado.

De acordo com VITAL *et al* (2006) dentre as teorias que explicam o fenômeno da adesão, destacam-se a teoria do enganchamento mecânico e da adsorção. Na primeira teoria a penetração do adesivo num substrato poroso leva a formação de ganchos ou entrelaçamentos mecânicos que se prendem nas camadas superficiais da madeira após a cura e endurecimento do adesivo. Segundo a teoria da adsorção a adesão é resultante do contato molecular entre os dois materiais que desenvolvem forças de atração superficiais.

Para que ocorra um contato íntimo e contínuo entre um adesivo e um substrato é necessário que o adesivo umidifique a madeira, para tanto deve ocorrer a migração do adesivo para dentro da estrutura submicroscópica da parede celular expulsando ar, água e outros componentes. Esta umidificação depende da natureza molecular do adesivo, qualidade da superfície, mobilidade molecular do

adesivo, pressão e tempo de colagem.

Alguns aspectos interferem no processo de colagem como a variabilidade na densidade e porosidade entre os lenhos iniciais e tardios, cerne e albarno, além da presença de extrativos nas cavidades dos elementos anatômicos. A densidade na madeira indica a quantidade aproximada de espaços vazios disponíveis para receber líquidos, como os adesivos, sendo assim, quanto menor a densidade, maior a permeabilidade na estrutura da madeira formando uma ligação interfacial mais forte entre o adesivo e a madeira (VITAL *et al* 2006).

No estudo desenvolvido por SERPA *et al* (2003), os resultados de resistência na linha de cola, utilizando o adesivo acetado de polivinila (PVA) para testes realizados com a medula da espécie *Eucalipto grandis*, com densidade de $0,55 \text{ g/cm}^3$ foi de 12MPa e para o *Pinus elliottii*, com a mesma densidade foi de 8MPa. Os resultados obtidos para resistência na linha de cola, em corpos de prova elaborados com medula foram maiores que os elaborados com madeira da região próxima a casca, tanto para o pinus como para o eucalipto. Este fato deve-se provavelmente segundo SERPA *et al* (2003) à maior densidade e menor permeabilidade da madeira próxima a casca, o que pode ter dificultado a penetração do adesivo. Geralmente, segundo VITAL *et al* (2006), as madeiras de folhosas, devido a sua constituição química e maior complexidade estrutural, apresentam maior dificuldade de colagem que as coníferas.

LOBÃO e GOMES (2006) realizaram ensaios com madeiras de eucalipto com aplicação de adesivo na proporção de 300 g/m^2 de resorcinol-formaldeído em face dupla e pressão de 1 MPa. Para os corpos de prova colados com madeiras de alta densidade ($0,82 \text{ g/cm}^3$) e com as fibras paralelas entre si, a resistência média encontrada foi de 9,7 MPa. Nos ensaios realizados por VITAL *et al* (2006) com juntas de três regiões do tronco das espécies de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliotti*, com aplicação de adesivo na proporção de 300 g/m^2 em face dupla de colagem utilizando adesivo resorcionol-formaldeído, observou-se que para a medula do eucalipto com densidade de $0,58 \text{ g/cm}^3$, um resultado de resistência ao cisalhamento de 7,9 MPa. Os resultados observados para os testes realizados com a região intermediária, entre a casca e a medula, do pinus com densidade de $0,45 \text{ g/cm}^3$ foi de 7,7 MPa.

Portanto o que se observa é que a medula do eucalipto não apresenta uma diferença significativa com o pinus, tanto quanto à densidade quanto aos resultados de testes de resistência a linha de cola, os maiores diferenciais estão entre os métodos de colagem e os tipos de adesivos. A falha na madeira, resultante após os ensaios de ruptura na linha de cola são um indicativo da qualidade da adesão, podendo ser mensuradas de acordo com a quantidade de madeira e integridade da linha de cola. Estas falhas na linha de cola são classificadas como fraturas rasas e profundas, sendo esta última a que define uma melhor qualidade de adesão, pois mantém a integridade da linha de cola.

Segundo LOBÃO e GOMES (2006), combinar duas espécies de densidades diferentes no processo de adesão, produz juntas com resistência menor que a madeira menos densa, ocorrendo ruptura sempre na madeira com menor densidade. Um maior percentual de falha na madeira está relacionado com uma maior eficiência do adesivo, no entanto, estas médias de falhas na madeira podem ter uma maior variação, como o encontrado por LOBÃO e GOMES (2006) entre 69 a 84% para a madeira eucalipto de diferentes densidades e em dois planos, perpendicular e paralelos às fibras, respectivamente.

| Tipos de adesivos | Local de uso | Adesivo Utilizados |
|--------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Estrutural | Uso exterior, sem restrições | Fenol-formaldeído |
| | | Resorcinol-formaldeído |
| | | Fenol - resorcinol-formaldeído |
| | | Polímero de emulsão/isocianato |
| | | Melanina-formaldeído |
| | Uso exterior, com restrições | Melanina-ureia-formaldeído |
| | | Isocianato |
| | | Epóxi |
| | Interior | Uréia-formaldeído |
| Caseína | | |
| Semi-estrutural | Uso exterior, com limitações | Polivinil acetato |
| Não-estrutural | Interior | Poliuretanos |
| | | Polivinil acetato |
| | | Animal |
| | | Elastômeros de construção |
| | | Elastômeros de contato |
| | | Hot-melt |

Tabela 1. Adesivos de madeira categorizados de acordo com seu desempenho estrutural previsto em níveis da exposição ambiental. Fonte: USDA (1999) apud Santos (2008).

Os adesivos estruturais geralmente são mais rígidos que a madeira, segundo SANTOS (2008), alguns exemplos incluem fenol, resocinol, melanina, uréia e caseína. Adesivos estruturais que mantêm sua resistência e rigidez sob saturação de água e a secagem cíclica mais severa são considerados adesivos inteiramente exteriores, chamados de estruturais. Adesivos rígidos que perdem sua habilidade de transferir mais rapidamente a carga que a madeira em condições de serviço, no que diz respeito a umidade são considerados adesivos para uso interior, os não-estruturais. Os adesivos que mantêm a resistência e a rigidez na água em curto prazo, mas se deterioram mais rapidamente que a madeira, são os semi-estruturais, podem ser usados externamente mas protegidos da umidade, como demonstra a tabela 1.

2.6 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Através da revisão bibliográfica, parâmetros são estabelecidos para elaboração dos painéis CLT, como classificação visual das espécies de madeira utilizadas e testes mecânicos não destrutivos e destrutivos. Esta norma permite que sejam utilizadas duas espécies diferentes para compor um painel CLT, no entanto cada espécie deve ocupar uma camada diferente.

A classificação visual e não destrutiva pelo método de ultrassom nas tábuas de pinus e medula de eucalipto, são metodologias eficientes para agrupar as peças analisadas em classes de valores dos módulos de elasticidade estático e dinâmico, afim de poder relacionar e comparar estas características com as propriedades resultantes nos testes mecânicos não destrutivos e destrutivos, realizados nos painéis CLT.

O adesivo dos tipos fenólico e poliuretanos, normalmente obtém-se bom desempenho na colagem nos painéis CLT. No estudo, os adesivos estruturais melanina-ureia-formaldeído e ureia-formaldeído, serão testados como opções viáveis diante do custo comercial, apresentado em comparação aos poliuretanos.

O que pode ser observado a respeito da interação a colagem entre as espécies pinus e eucalipto é que a absorção do adesivo pela madeira pinus é

maior em relação a madeira eucalipto. Quanto à falha na linha de cola, que demonstra a qualidade de colagem, o eucalipto apresenta um menor desempenho em relação ao pinus. A direção dos planos de colagem é outro fator que influencia na qualidade de adesão. Planos de colagem perpendiculares, apresentam um menor valor de resistência em comparação aos resultados apresentados para colagens nos planos paralelos em relação às fibras.

Quanto aos painéis CLT, a norma ANSI/APA PRG 320 (2012) regulamenta os testes que determinam valores mínimos de resistência e rigidez, que são utilizados como parâmetros de comparação aos resultados obtidos nos testes mecânicos destrutivos e não-destrutivos elaborados deste estudo. A literatura observada apresenta valores máximos 53,1 MPa e mínimos de 25,5 MPa para MOR. Para os resultados de MOE, os valores observados na literatura estão entre 5.970 MPa e 35.000 MPa. A determinação da norma ANSI/APA PRG 320 (2012) para valor mínimo de MOR é de 10 MPa, assim como de 8.300 MPa para MOE.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados no estudo foram tábuas de madeira das espécies *Pinus ssp*, provenientes do desobro de pranchas secas e armazenadas no laboratório de estruturas da Universidade Estadual de Londrina e medula de *Eucalipto grandis*, proveniente de floresta plantada da região de Telêmaco Borba-Pr, desdobrada, seca em estufa e armazenada pela empresa Tecnomade.

A metodologia utilizada neste trabalho foi:

-Classificar as peças de pinus e eucalipto de forma visual e mecânica não destrutiva por meio de ultrassom;

-Testes de cisalhamento em corpos de prova elaborados com pinus e eucaliptos utilizando dois adesivos estruturais, ureia formaldeído e melanina ureia formaldeído;

- Elaboração dos painéis CLT;

- Testes de flexão para a determinação da resistência e da rigidez nos painéis CLT fabricados;

3.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS PEÇAS DE EUCALIPTO E PINUS.

De acordo com a norma NBR 9487 (1986), que classifica madeira serrada de folhosas, a medula é um defeito considerado inadmissível em qualquer uma das quatro classes, portanto como todas as peças analisadas são compostas em sua maioria por medula, não seria possível sua utilização estrutural. No entanto, tendo como objetivo de agregar valor a estas peças, consideradas rejeitos nas serrarias e na pretensão de que o impacto deste defeito seja pulverizado na composição de painéis de CLT, as peças foram incluídas no estudo.

A classificação visual nas peças de medula de eucalipto seguiu os critérios de seleção da norma NBR 9487 (1986) para os demais defeitos, como rachaduras e nós. Foi realizada uma pré-seleção em um lote com 416 tábuas de

medula de eucalipto, cedidas pela empresa Tecnomade, localizada em Telêmaco Borba – Pr. Das 416 peças, foram avaliadas as quatro faces de apenas 147 peças de medula de eucalipto com 300cm x 10cm x 2,6cm. Os defeitos como rachaduras, nós e fendas foram fotografados e anotados. Do total do lote, 207 foram consideradas aproveitáveis como peças menores com dimensões abaixo de 180 cm, devido as rachaduras observadas. As demais 62 peças ou 14% do total, foram descartadas por apresentarem mais de 60% de defeitos visuais em seu comprimento, como mostra a figura 29.



Figura 29. Rachadura da peça de medula de eucalipto. Fonte: Autor.

Nas peças de pinus, a classificação visual, foi realizada de acordo com as normas NBR 11700 (1990) e ATSM D245 (1998), assim como o manual de classificação elaborado por MOURA *et al* (2012). Foram classificadas visualmente 80 tábuas derivadas do desdobro de 20 pranchas, que já haviam sido previamente classificadas, armazenadas no Laboratório de Estruturas da Universidade Estadual de Londrina – UEL. De cada prancha de 300 cm x 30 cm x 5 cm, foram extraídas 4 tábuas de 300 cm x 12,5 cm x 2,4 cm, nomeadas por A,B,C e D, e número da prancha, para se referenciar às pranchas originárias.



Figura 30. Classificação visual das tábuas de Pinus. Fonte: Autor.

Os defeitos considerados na classificação visual, tanto do eucalipto como do pinus, foram: a quantidade de nós, as fendas e as rachaduras apresentadas nas peças. As peças com defeitos tais como esmoado, encanoamento, torcimento e arqueamento, foram excluídas na pré-seleção, pois tais deformações dificultariam o contato necessário entre camadas adjacentes do painel estrutural CLT. As peças de medula de eucalipto apresentaram rachaduras, fendas e nós como principais defeitos, que tiveram suas dimensões anotadas para a classificação, como mostra a figura 9. No caso do pinus, não foram encontradas fendas e rachaduras, mas um número considerável de nós, como demonstra a figura 30.

As peças de pinus foram diferenciadas em quatro classes: Estrutural especial (ES), Estrutural nº 1 (S1), Estrutural nº2 (S2), Estrutural nº 3 (S3). Dos defeitos admissíveis para cada classe estrutural, foram analisados os mais relevantes para o estudo, de acordo com tabela de classificação visual elaborada por MOURA *et al* (2012), baseada na norma ASTM D 245-93 (1998).

3.2. CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA NÃO DESTRUTIVA DAS PEÇAS DE EUCALIPTO E PINUS.

3.2.1. Ensaio de ultrassom.

Após a classificação visual, as peças foram medidas e pesadas. Posteriormente se realizou em cada tábua de pinus e eucalipto o ensaio de ultrassom, a fim de se obter o módulo de elasticidade dinâmico da madeira. O equipamento utilizado é da marca Agricef e o modelo é USLab. Possui potência de 700 V e transdutores com encapsulamento metálico, que operam com frequência de aproximadamente 45 kHz e medem diretamente o tempo de propagação das ondas em microssegundos (μs).

Os transdutores foram colocados no centro de cada extremidade das tábuas, com aplicação de uma camada de aproximadamente 1 mm de gel sem álcool, a fim de se obter a velocidade de propagação das ondas pelo meio, através da relação entre o tempo de percurso e a distância percorrida. Foi adotado o comprimento médio para as pranchas de eucalipto e pinus com 3 m. Para cada tábua foi realizada apenas uma medida, como mostra a figura 31.



Figura 31. Medição de Ultrassom nas peças de eucalipto. Fonte: Autor.

3.2.2 Medição de Umidade

A umidade foi medida utilizando o aparelho DL 2000 da marca Digisystem, que contém dois pinos que devem ser introduzidos na peça em dois terços da espessura, ou seja, em torno de 8 mm, conforme figura 32. A medição foi realizada geralmente na área central das peças e distanciada de fendas e nós, para

que não houvesse interferência destes parâmetros na medição. O mesmo procedimento foi realizado nas peças de pinus, os valores encontrados foram em torno de 10% de umidade, nas peças de pinus e eucalipto, ambas secas anteriormente em estufa.



Figura 32. Medidor de Umidade da madeira. Fonte: autor.

Os valores observados para umidade do pinus e do eucalipto foram:

| | Eucalipto | Pinus |
|-----------------------------|------------------|--------------|
| Valor máximo | 13,3 | 9,6 |
| Valor mínimo | 7,5 | 7,2 |
| Média | 9,28 | 8,16 |
| Desvio Padrão | 0,94 | 0,61 |
| Coefficiente de Variação(%) | 10,12 | 7,47 |

Quadro 5. Valores de umidades para Eucalipto e Pinus. Fonte: autor

3.2.3 Classificação estrutural mecânica não-destrutiva das peças de pinus e eucalipto.

A classificação estrutural mecânica e não-destrutiva, das peças de pinus e eucalipto, foi realizada segundo as orientações da norma ASTM D 4761 (2002) como metodologia a ser adotada em campo, sem uso de aparelhos eletrônicos de medição. As peças foram dispostas em dois cavaletes metálicos,

distanciados de 2,40 m. Uma peça de madeira foi utilizada como apoio para marcar o centro das peças e medir a flecha.

A flecha medida foi aquela correspondente ao eixo de menor inércia (*flatwise*). Após a peça ser colocada no cavalete, eram marcados o centro e a altura da face inferior até a peça de apoio obtendo-se a flecha inicial devida ao peso próprio da tábua, logo em seguida foi aplicada uma força de 10 kg no centro da peça e medida a altura resultante da face inferior da peça até a referência, determinando a flecha final.

O resultado final obtido pela subtração da flecha inicial da final, determinou a flecha resultante da peça analisada, sendo o valor utilizado para determinação do Módulo de elasticidade estático, através da Eq. (4).

$$MOEe = \frac{F \cdot x}{48 \cdot \Delta V \cdot I} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

MOEe = módulo de elasticidade Estático (MPa);

F = Força (N);

L = vão da tábua (mm);

ΔV = deslocamento ou flecha final (mm)

I = momento de inércia da seção transversal (mm⁴).

Os resultados obtidos para módulos de elasticidade dinâmicos foram utilizados para determinar os quatro agrupamentos das peças de pinus e eucalipto para a composição dos painéis de CLT.

3.3. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ADESÃO EM TESTE EM CORPOS DE PROVA

3.3.1. Elaboração dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram confeccionados livres de defeitos, de acordo com as normas ASTM D 905 (2008) e a NBR 7190 (1996), conforme figura

33, com valor médio de densidade de $0,60 \text{ g/cm}^3$ para o eucalipto e $0,61 \text{ g/cm}^3$ para o pinus. Os valores obtidos de $\text{MOE}_{\text{estático}}$ para o eucalipto foi de 8.342 MPa e de 11.142 MPa para o pinus. As tábuas, tanto de pinus como de eucalipto foram secas em estufa e apresentaram teor de umidade com média de 9%.

Para confecção dos corpos de prova, as tábuas de pinus e eucalipto passaram por um processo de aparelhamento e aplainamento, para eliminar partículas na superfície da peça e possibilitar a abertura dos poros da madeira, facilitando o processo de penetração do adesivo.

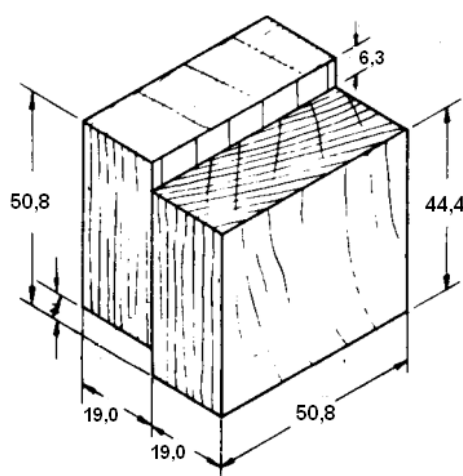


Figura 33. Corpo de prova para a realização do ensaio de cisalhamento da linha de cola (dimensões em mm). Fonte: ASTM D-905 (ASTM 2008).

Foram elaborados 72 corpos de prova, para testes de cisalhamento na linha de cola. Destes, 36 foram colados com o adesivo estrutural melanina-uréia-formaldeído (MUF), cedido pela empresa Akzonobel e os demais corpos de prova confeccionados com o adesivo estrutural uréia-formaldeído (UF), que possui assim como o valor comercial, características químicas semelhantes ao adesivo MUF. Além do comparativo entre os adesivos, outro objetivo do estudo é comparar a resistência ao cisalhamento na linha de cola relacionado a direção das fibras e a combinação de espécies como mostra o quadro 1. Foram formados três grupos diferentes com a combinação de espécies da seguinte forma: pinus/pinus, eucalipto/pinus e eucalipto/eucalipto. Cada grupo foi composto de 12 corpos de prova, sendo 6 colados na direção perpendicular às fibras e 6 na direção paralela, com dois tipos de adesivos, MUF e UF, como demonstra a figura 34. Desta forma

foram compostos 6 repetições para cada tipo de corpo de prova proposto.

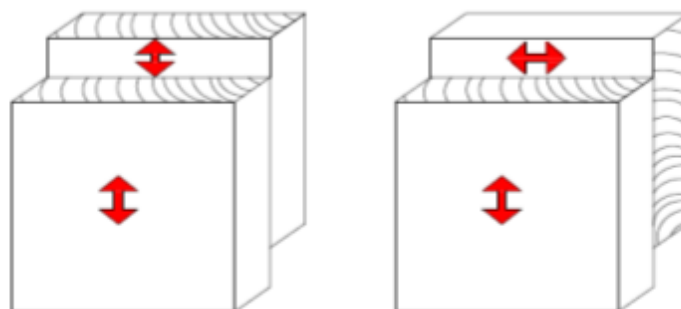


Figura 34. Orientação das fibras dos corpos de prova para a realização do ensaio de cisalhamento da linha de cola. Fonte: autor.

O adesivo melanina-ureia-formaldeído (MUF) utilizado em colagens estruturais tem características semelhantes aos do fenol formaldeído, também um bi-componente. A gramatura recomendada é de 400 g/m² e o tempo de montagem é de 50 min a 30°C e de 150 minutos a 15°C. O tempo para prensagem e secagem deve variar de 3 a 10 horas, dependendo da temperatura ambiente. A preparação dos corpos de prova com o adesivo MUF, foi realizada utilizando-se para cada 100 partes da resina, 20 partes do catalizador, aplicados com auxílio de uma espátula de silicone. Os corpos de prova foram prensados a frio, com pressão de 0,7 Mpa por um período de 6 horas, conforme recomendações do fabricante.

Para que houvesse uma homogeneização na prensagem, foi elaborado um aparato de madeira onde foram colocados os corpos sobrepostos, protegidos com um filme plástico, para que não houvesse contato da cola de um corpo de prova com o outro e também com a parte interna do aparato, como mostra a figura 21 e 22. A pressão foi controlada através de um sistema de pêndulo, no qual foram adicionados pesos aferidos até a obtenção da pressão requerida, como demonstra a figura 35 e 36.

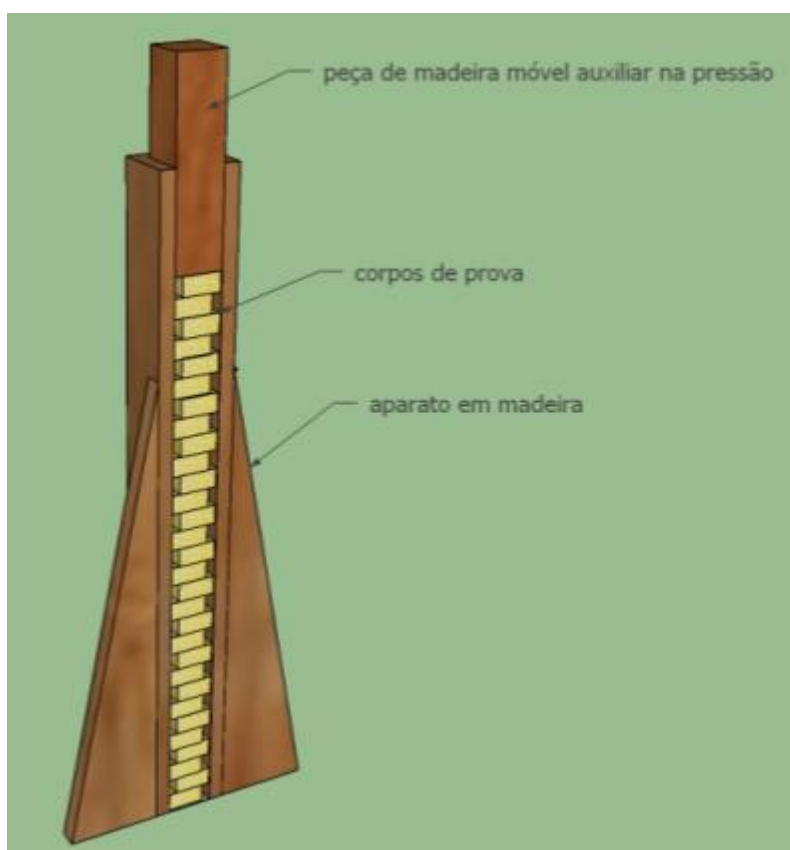
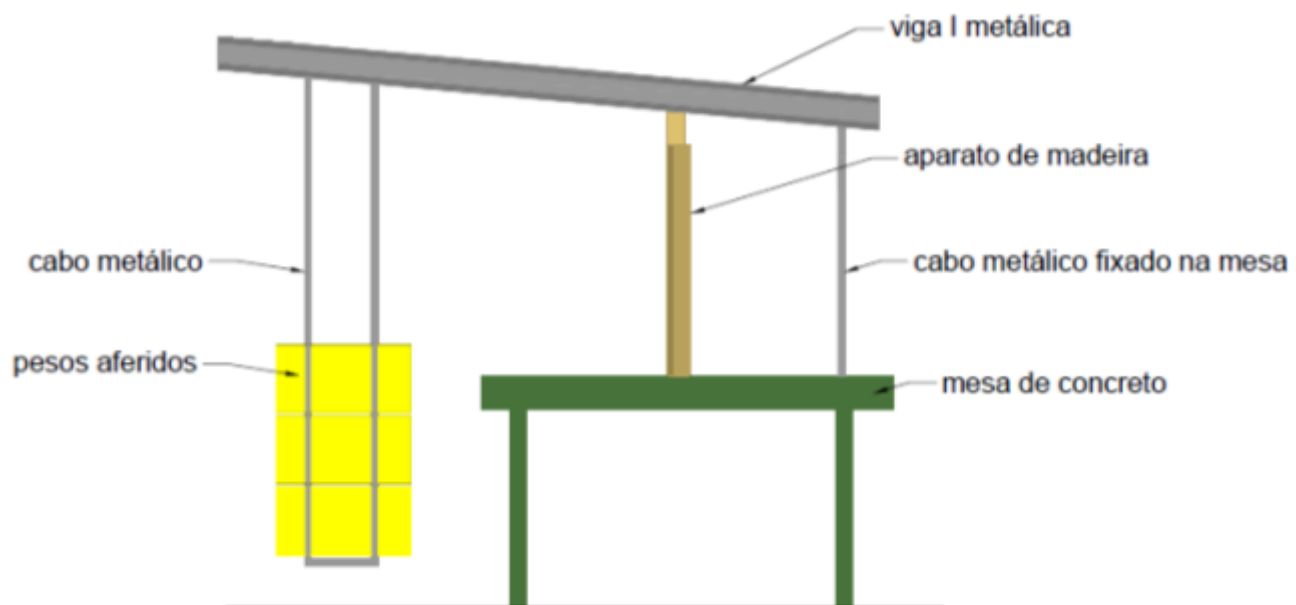


Figura 35. Aparato Elaborado para Realizar os testes de colagem. Fonte: Autor



Figura 36. Aparato elaborado para prensagem dos corpos de prova. Fonte: autor.

A preparação do adesivo Ureia-formaldeído, segundo orientações do fabricante, foi a seguinte: 100 partes de adesivo, 20 partes de água, 7 partes de catalizador preparado endurecedor HLE-30 e 20 partes de extensor à base de farinha de trigo. Para melhor visualização e análise da falha na linha de cola, foi adicionado corante (anilina) verde na composição, conforme figura 37. Assim como na aplicação do MUF, a gramatura do adesivo UF foi de 400 g/m², com auxílio de uma espátula de silicone. Ainda segundo recomendações do fabricante, os corpos de prova foram prensados a frio com pressão de 1,2 MPa por um período de 6 horas.



Figura 37. Preparação do adesivo Ureia-formaldeído com adição de corante. Fonte: autor.

3.3.2. Teste de Cisalhamento nos Corpos de Prova

As juntas coladas foram testadas, segundo a norma ASTM D-905 (ASTM 2008), por cisalhamento na compressão, como demonstra a figura 38.



Figura 38. Teste de cisalhamento. Fonte: autor.

Seguindo as recomendações da literatura descritas por LOBÃO *et al.* (2006), após a ruptura o percentual de falha na madeira das partes do corpo de prova foi avaliado com o uso de lâminas transparentes, previamente quadriculadas, e com dimensões que atendessem a variabilidade observada para as dimensões dos cp. O quadriculado das lâminas dividiu o plano cisalhado em 25 partes, de modo que cada quadrícula representasse 4% da área em análise. Considerou-se como falha na madeira a fratura profunda, com o arrancamento de partes de madeira, assim como a falha rasa com presença visível de fibras na superfície da ruptura.

Após testes de ruptura, 10 corpos de prova, escolhidos aleatoriamente, para o processo de secagem em estufa a 60° C por um período de 24 horas, para determinação do teor de umidade.

3.3.3 Elaboração dos Painéis CLT

As peças de pinus e eucalipto depois de classificadas pelo método ultrassom foram separadas em três categorias de acordo com os valores obtidos de Módulo de elasticidade dinâmico (Quadro 6).

| | 3 Painéis EEE | 3 Painéis EPE | 3 Painéis PPP | 3 Painéis PEP |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Grupo 1 | 17.374 a 29.396 | 15.132 a 29.396 | 15.132 a 28.265 | 15.132 a 29.396 |
| Grupo 2 | 14.036 a 17.367 | 10.818 a 17.367 | 10.818 a 14.991 | 10.818 a 17.367 |
| Grupo 3 | 10.797 a 14.000 | 3.097 a 14.000 | 3.097 a 10.344 | 3.097 a 14.000 |

Quadro 6. Formação dos Painéis CLT de acordo com grupos de resultados de MOE dinâmico (valores em MPA). Fonte: autor

Quando avaliado o lote de peças de eucalipto, houve muitas peças descartadas devido ao grande índice de fendilhamento. Mesmo sendo com dimensões menores que 20 cm, optou-se por escolher as peças sem defeitos para uma melhor colagem. Por esta razão os intervalos dos valores de módulo de elasticidade dinâmicos do grupo 3 do eucalipto foram superiores aos do pinus, grupo de cujas peças classificadas nenhuma foi descartada, pois os defeitos identificados foram somente os nós.

As peças longitudinais e transversais de cada grupo foram identificados com cores diferentes. O grupo 1 foi pintado com spray vermelho no topo da peça, o grupo 2 de azul e o grupo 3 de verde. As peças sem marcação foram utilizadas para compor os painéis sem classificação, denominados aleatórios, como demonstram a figura 25. Esta identificação meio de cores proporcionou rapidez ao processo de montagem e facilitou a identificação dos painéis depois de prontos.

A fabricação dos painéis CLT da pesquisa foi realizada em uma empresa especializadas em produzir portas que está situada em Ibiporã, cidade vizinha a Londrina. Esta empresa dispõem de uma prensa com controle de pressão, com 4 bandejas, o que possibilitou a execução dos painéis com a precisão prescrita em norma. As peças de pinus e eucalipto foram desengrossadas 24 horas antes do

processo de fabricação dos painéis, afim de retirar uma fina camada da tábua para possibilitar abertura dos poros da madeira e proporcionar uma melhor absorção do adesivo, segundo recomendação do *FPinnovations* (2012).



Figura 39. Separação por cores das tabuas de pinus e eucalipto de acordo com o módulo de elasticidade. Fonte: autor

O adesivo utilizado para produzir os painéis CLT foi o melanina uréia formáldeído (MUF). A preparação do adesivo para aplicar nos painéis seguiu orientação do fabricante utilizando-se para cada 100 partes da resina, 20 partes do catalizador. Para obter-se a gramatura de 400g/m² esta proporção foi medida através de uma balança de precisão, como mostra a figura 40.



Figura 40. Pesagem do Adesivo. Fonte: autor

A montagem dos painéis CLT foi realizada sobre uma superfície metálica rígida apoiada em dois tripés de madeira. Afim de evitar que as peças de madeira colassem no apoio, o painel foi montado sobre uma manta plástica, como mostra a figura 41.



Figura 41. Montagem do Painel CLT. Fonte: autor.

A primeira camada é composta por 6 tábuas com largura de 10 cm colocadas uma ao lado da outra e aplicando-se sobre o conjunto o adesivo com o auxílio de uma espátula de silicone. Após esse processo a camada de peças transversais foi adicionada, posicionando-se as peças uma ao lado da outra, como demonstra a figura 42.



Figura 42. Montagem do Painel CLT. Fonte: autor.

Logo a seguir da colocação das camadas transversais, novamente foi aplicado o adesivo, na mesma quantidade que utilizado na camada anterior, como mostra a figura 43. Acima desta segunda camada transversal foram posicionadas as peças longitudinais, finalizando a montagem do painel. Segundo as especificações do fabricante do adesivo MUF o tempo em aberto, ou o período em que as superfícies a colar entrem em contato é de de 50 minutos a 30°C e de 150 minutos a 15°C. A temperatura ambiente no momento da elaboração dos painéis era de 28°C e o tempo de montagem ocorreu na média de 30 minutos. Não houve colagem nem prensagem das laterais.



Figura 43. Aplicação do Adesivo MUF com espátula. Fonte: autor.

Após finalizar o processo de montagem do painel, outra manta plástica foi utilizada para envolver as peças com a finalidade de evitar colagem entre o painel e a bandeja da prensa (figura 44).



Figura 44. Preparação para prensagem do Painel CLT. Fonte: autor.

Como demonstra a figura 45, depois de montados os painéis foram posicionados nas bandejas da prensa. O tempo de prensagem a frio foi de 6 horas e a pressão estabelecida em 0,8 MPa.



Figura 45. Prensagem do Painel CLT. Fonte: autor.

Após finalizar todo o processo de fabricação dos painéis, os mesmos foram transportados para o laboratório de materiais da Universidade Estadual de

Londrina (UEL), para realização dos ensaios de flexão para determinação da resistência e rigidez.

O equipamento utilizado para os testes executados nos painéis CLT, foi a máquina de ensaio EMIC modelo DL-30000 com capacidade de força de 30000 kgf (300kN), como mostra a figura 46.



Figura 46. Painel CLT no equipamento para teste de flexão e ruptura. Fonte: autor.

Os valores obtidos nos ensaios, foram determinados de acordo com a metodologia de teste prescrita no anexo B da norma NBR 7190 (2012), conforme figura 46. Este diagrama de carregamento da norma foi transformado em um script do programa TESC que forneceu todos os dados durante o ensaio, tais como: a deformação em todas as porcentagens força aplicada no painel, o tempo e a carga de ruptura.

A execução do ensaio de flexão dos painéis obedeceu às normas NBR 7190 (2012) anexo B e ASTM D 198 (2009). A carga é aplicada por “cutelo”, perpendicularmente à face do painel pelo método de flexão em quatro pontos, como demonstra a figura 47.



Figura 47. Ensaio de flexão (4 pontos). Fonte: autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS PEÇAS DA MEDULA DO EUCALIPTO *GRANDIS* E *PINUS SPP.*

O resultado da classificação visual das peças de medula de Eucalipto, de acordo com a NBR 9487 (1986), das 147 peças analisadas, considerou 81 peças ou 55 % admissíveis para 4º classe, pois apresentaram rachaduras com menos de 60 cm nas extremidades, ou 20% do comprimento, sendo nesta classe permitidos nós sem restrições. As demais 66 peças, ou 45% do total apresentaram rachaduras com dimensões superiores a 20% do comprimento da peça, portanto não se enquadrariam em nenhuma classificação.

O resultado da classificação visual das peças analisadas de pinus (quadro 7) permitiu o agrupamento das tábuas em quatro classes: Estrutural especial (ES), Estrutural nº 1 (S1), Estrutural nº2 (S2), Estrutural nº 3 (S3), de acordo com a norma ATSM D 245 (1998) segundo o manual de classificação elaborado por MOURA *et al* (2012).

| Espécie | ES | S1 | S2 | S3 | Total de peças |
|------------------|--------|----------|----------|----------|----------------|
| <i>Pinus spp</i> | 4 (5%) | 17 (21%) | 32 (40%) | 27 (34%) | 80 |

Quadro 7. Dados obtidos a partir da classificação visual da espécie *Pinus spp.* Fonte: autor

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS PEÇAS DA MEDULA DO EUCALIPTO.

O quadro 8 apresenta os valores obtidos do Módulo de Elasticidade dinâmico e estático para as peças com medula de eucalipto, assim como os valores da densidade, da velocidade de ultrassom e da flecha final. Em relação ao $MOE_{dinâmico}$, houve uma diferença expressiva entre o maior e o menor valor encontrado, com coeficiente de variação de 26,72%, o que mostra dispersão relativamente alta dos resultados. Esta amplitude pode ser atribuída à alta variação dos valores de densidade ligados à presença heterogênea de medula na peça.

| Espécie | | Densidad e aparente $\rho_{\text{apa}} 12\%$ (kg/m ³) | V (m/s) | ΔF (cm) | MOE _{estático} | MOE _{dinâmico} | % de diferenças |
|-----------|--------|---|---------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| eucalipto | máximo | 0,74 | 6.298 | 3,6 | 14.460 | 19.114 | 25 |
| | mínimo | 0,37 | 2.164 | 1,5 | 6.025 | 5.028 | 16 |
| | Média | 0,51 | 4.908 | 2,52 | 8.915 | 12.410 | 33 |
| | CV (%) | 16 | 14 | 19 | 20 | 26 | 23 |

Quadro 8. Dados obtidos de Módulo de Elasticidade Dinâmico e Módulo de Elasticidade Estático para o eucalipto. Fonte: autor.

Quanto ao MOE_{estático}, a amplitude dos resultados é menor que para o MOE_{dinâmico}, como consequência, o coeficiente de variação é também menor (20,27%), mostrando uma dispersão mais baixa dos resultados. Neste protocolo, os valores de MOE_{estático} tenderam a ser menores que os dinâmicos, em torno de 25%.

A figura 48 apresenta a relação entre o módulo estático e o dinâmico. O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,45, inferior aos resultados dos ensaios de ultrassom reportados na literatura, realizados por CANDIAN *et al* (2009) em peças de *Corymbia citriodora*, foi de 0,76. No estudo desenvolvido com *Eucalipto grandis* por TARGA *et al* (2005), os resultados obtidos para MOE_{dinâmico} foram de 17 MPa e para MOE_{estático} de 15,3 MPa com $R^2 = 0,87$. De novo esta correlação mais fraca entre os dois parâmetros pode ser atribuída à acentuada presença de medula nas peças.

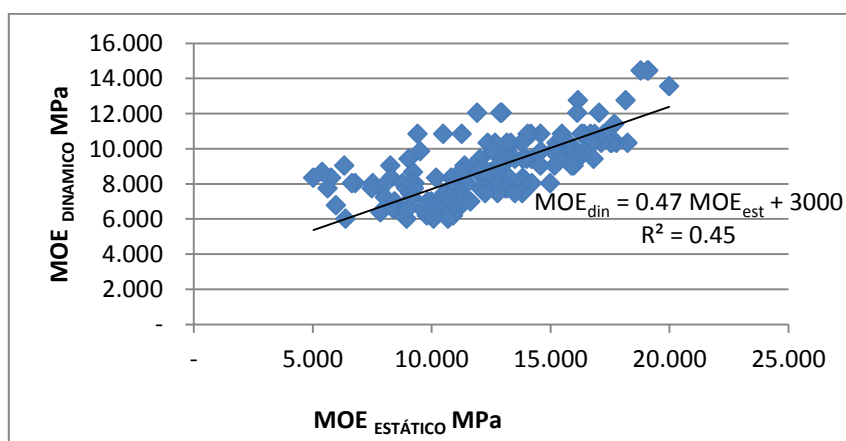


Figura 48. Relação entre o MOE estático e MOE dinâmico do eucalipto. Fonte: autor

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS PEÇAS DE PINUS.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados nas peças de pinus, conforme dados do quadro 4 mostraram-se coerentes com as variáveis, densidade, velocidade de ultrassom e flecha final, para os valores de $MOE_{estático}$ e $MOE_{dinâmico}$. No entanto os coeficientes de variação dos valores de $MOE_{estático}$ e $MOE_{dinâmico}$ foram de 36,77% e 37,18% respectivamente, acima do observado no eucalipto, mostrando uma dispersão ainda mais acentuada nos resultados. Assim como no caso anterior, na média os valores de $MOE_{estático}$ tenderam a ser mais baixos que os $MOE_{dinâmico}$ ficando em torno de 15% destes.

| Espécie | | $\rho_{apa\ 12\%}$ (kg/m ³) | V (m/s) | ΔF (cm) | $MOE_{estát}$ ico | $MOE_{dinâmico}$ | % de diferen ças |
|---------|--------|--|------------|--------------------|----------------------|------------------|------------------------|
| Pinus | máximo | 0,72 | 5.899 | 3,9 | 20.258 | 24.009 | 15 |
| | mínimo | 0,36 | 2.285 | 1,0 | 4.363 | 2.793 | 35 |
| | Média | 0,53 | 4.565 | 2,2 | 9.720 | 11.385 | 14 |
| | CV (%) | 14 | 17 | 29 | 36 | 37 | 3 |

Quadro 9. Dados obtidos de Módulo de Elasticidade Dinâmico e Módulo de Elasticidade Estático para o pinus. Fonte: autor.

A figura 49 apresenta a relação entre os ensaios dinâmicos e estáticos. Observou-se através da análise dos resultados da relação entre o Módulo de elasticidade estático e dinâmico para os testes realizados nas peças de pinus, o coeficiente de determinação (R^2) 0,67. Estes resultados confirmam aqueles apresentados pela literatura, tais como os obtidos por OLIVEIRA *et. al* (2003) de $R^2=0,83$ em ensaios realizados em *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, altamente significativo, assim como os resultados obtidos por CARDIN (2011) que R^2 é igual a 0,65 entre o $MOE_{estático}$ e $MOE_{dinâmico}$. Nos testes elaborados por BALLARIN *et al* (2005) observaram-se valores de $MOE_{dinâmico}$ de 11.816 MPa para a madeira juvenil e 17.914 MPa para madeira adulta de *Pinus taeda*, com $R^2=0,89$ entre $MOE_{dinâmico}$ e $MOE_{estático}$.

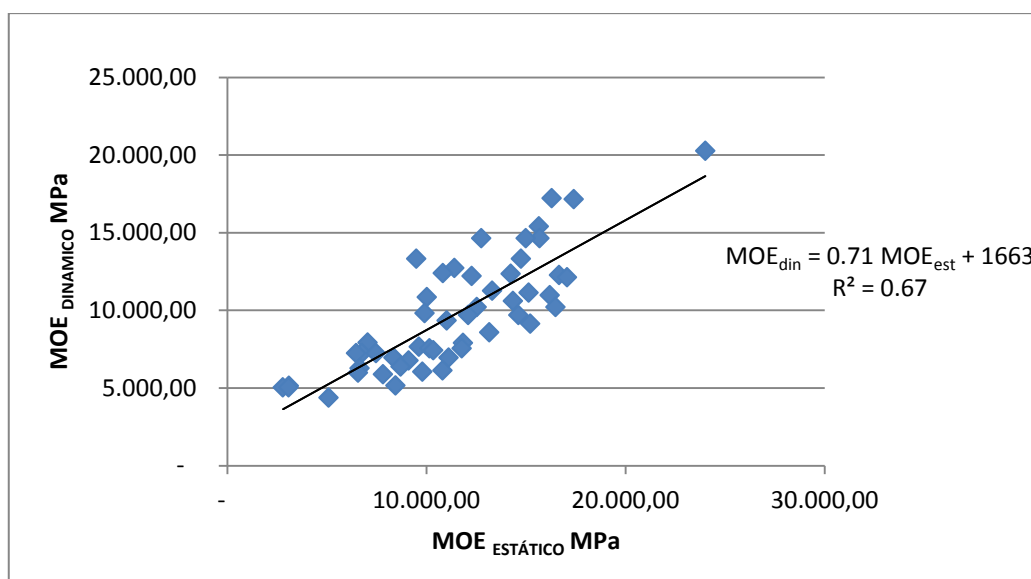


Figura 49. Relação entre o Módulo de elasticidade estático e dinâmico para o *Pinus spp.*
 Fonte: Autor.

A análise das tabelas e gráficos anteriores permite dizer que na média os valores de módulo de elasticidade dinâmico e estático das duas espécies estudadas são bastante próximos, (8.915 MPa e 12.410 MPa para o eucalipto contra 9.720 MPa e 11.385 MPa para o pinus, respectivamente) o que permitiu uma associação de peças com propriedades similares entre as duas espécies, nos painéis mistos, bastante equitativa.

Para elaboração dos painéis CLT, o agrupamento das peças de pinus e eucalipto foi realizado de acordo com classificação não destrutiva por ultrassom.

4.4. RESULTADO DOS TESTES DE CISALHAMENTO NOS CORPOS DE PROVA

Os resultados dos testes de cisalhamento nos corpos de prova colados no plano paralelo às fibras são mostrados no quadro 10 .

| Adesivo | | pinus / pinus | | eucalipto / eucalipto | | pinus / eucalipto | |
|---------|---------------|---------------|-------|-----------------------|-------|-------------------|-------|
| | | = | ⊥ | = | ⊥ | = | ⊥ |
| MUF | Valor máximo | 23,56 | 7,14 | 24,09 | 5,71 | 21,42 | 6,07 |
| | Valor mínimo | 16,06 | 5,53 | 14,28 | 3,75 | 18,74 | 4,28 |
| | Valor médio | 21,77 | 6,31 | 16,93 | 4,52 | 19,28 | 5,29 |
| | Desvio padrão | 2,84 | 0,51 | 3,29 | 0,61 | 1,36 | 0,61 |
| | CV % | 13,04 | 8,08 | 19,41 | 13,42 | 7,05 | 11,47 |
| UF | Valor máximo | 21,42 | 6,96 | 14,99 | 4,82 | 15,88 | 6,43 |
| | Valor mínimo | 15,71 | 3,57 | 6,07 | 2,14 | 9,46 | 4,46 |
| | Valor médio | 18,92 | 5,29 | 8,71 | 3,24 | 12,14 | 5,53 |
| | Desvio padrão | 3,08 | 1,16 | 3,23 | 0,85 | 3,51 | 0,64 |
| | CV% | 16,29 | 22,01 | 37,05 | 26,11 | 28,93 | 11,49 |

Quadro 10. Resultados dos testes de cisalhamento nos corpos de prova colados no plano paralelo e perpendicular às fibras (MPa). Fonte: autor

O quadro 10 indica que os corpos de prova colados com o adesivo Melanina-Ureia-Formaldeído (MUF) apresentaram valores médios superiores, em relação ao adesivo Ureia-formaldeído (UF), em todos os planos de colagem exceto no sentido perpendicular pinus/ eucalipto (5,29 x 5,53). Os maiores valores médios foram resultantes da colagem do pinus com pinus no plano paralelo as fibras com o adesivo MUF, 15% superior ao valor médio obtido com o adesivo UF para os corpos de prova de mesma configuração. Nos corpos de prova eucalipto/eucalipto, houve uma diferença de 51% entre os resultados obtidos nas colagens com adesivo MUF e UF, para os corpos de prova pinus/eucalipto, com o adesivo MUF observou-se valor superior a 37% em relação ao adesivo UF.

Houve uma diferença maior entre os coeficientes de variação (CV%) para os resultados obtidos nos corpos de prova eucalipto/eucalipto e pinus/eucalipto elaborados com o adesivo UF, em relação aos corpos de prova elaborados com MUF. Para os corpos de prova pinus/pinus, os resultados obtidos foram próximos para os dois adesivos testados, no entanto, maiores para o adesivo MUF, o que pode indicar uma melhor absorção dos adesivos pela madeira pinus em relação ao eucalipto.

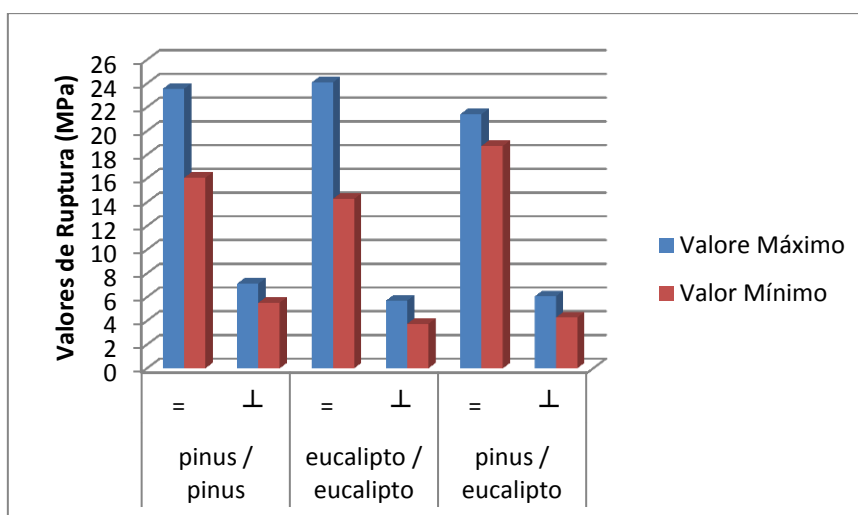


Figura 50. Gráfico dos Resultados das colagens com adesivo MUF, nos sentido paralelo e perpendicular às fibras. Fonte: autor

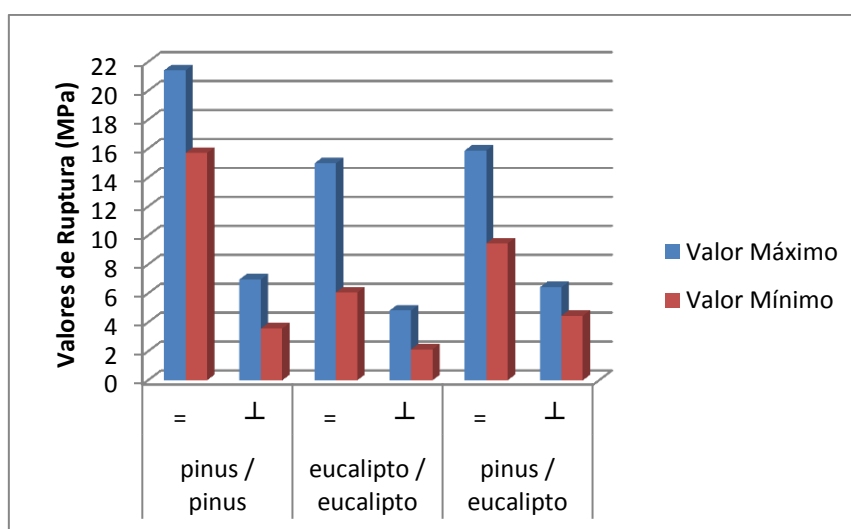


Figura 51. Gráfico com Resultados das colagens com adesivo UF, nos sentidos paralelo e perpendicular às fibras. Fonte: autor

Pode ser observado nas figuras 50 e 51 que os valores encontrados para os corpos de prova confeccionados no plano perpendicular às fibras variaram 51% entre o maior e o menor valor, utilizando-se os adesivos MUF e UF, similar à variação encontrada na colagem dos corpos de prova no sentido paralelo às fibras.

Os menores valores médios foram resultantes nos grupos de corpos de prova da composição eucalipto com eucalipto, colados no plano perpendicular às fibras com adesivo UF. Corpos de prova colados com adesivo MUF apresentaram valores médios superiores aos colados com UF, variando de 12% a 46%, tanto para colagens no plano paralelo às fibras como para a colagem perpendicular às fibras.

Somente no grupo de colagem entre o pinus e eucalipto no plano

perpendicular às fibras, o adesivo UF apresentou valores médios 5% superiores ao adesivo MUF. Assim como no resultado das colagens paralelas às fibras, observou-se para os corpos de prova com madeira pinus resultados superiores para os dois adesivos em relação as composições com eucalipto.

As maiores diferenças entre os resultados médios obtidos foram entre os planos de colagens. A direção paralela às fibras atingiu valores médios superiores, entre 53% a 72% em comparação aos grupos de corpos de prova colados no plano perpendicular às fibras, como demonstram os quadros 8 e 9. Resultados obtidos por LOBÃO *et. al* (2006), na comparação entre valores médios de colagem em madeiras com as fibras no sentido perpendicular e paralelo aos esforços foram 41% maior para o plano colado paralelo às fibras.

Segundo o estudo sobre colagens entre pinus e medula de eucalipto realizado por SERPA *et. al* (2003), os resultados de valores médios para resistência na linha de cola, utilizando o adesivo ureia-formaldeído foram de 12MPa para o pinus e de 8 MPa para o eucalipto, abaixo dos valores médios obtidos neste estudo.

O quadro 11 apresenta os resultados obtidos após análise visual dos corpos de prova, rompidos no teste de cisalhamento.

| | | Adesivo MUF | Adesivo UF |
|--------------------------------|---------------------|--|--|
| Colagem no Plano Paralelo | pinus/pinus | Fratura Profunda 50% e Fratura Rasa 50% | Fratura Profunda 45% e Fratura Rasa 55% |
| | eucalipto/eucalipto | Fratura Profunda 65% e Fratura Rasa 35% | Fratura Profunda 36%, Fratura Rasa 53% e falha na linha de cola 11% |
| | pinus/eucalipto | Fratura Profunda (Eucalipto) 88% e Fratura Rasa (Eucalipto) 12% | Fratura Profunda 20% e Rasa 20% (Eucalipto) 60% falha na linha de cola |
| Colagem no Plano Perpendicular | pinus/pinus | Fratura Rasa 95% falha na linha de cola 5% | Fratura Rasa 42% e falha na linha de cola 68% |
| | eucalipto/eucalipto | Fratura Profunda 13% Fratura Rasa 53% e 34% falha na linha de cola | Fratura Rasa 5% e falha na linha de cola 95% |
| | pinus/eucalipto | Fratura profunda (Eucalipto) 38% e Fratura Rasa (Eucalipto) 62% | Fratura Profunda (Eucalipto) 15%, Fratura Rasa (Eucalipto) 10% Fratura Rasa (Pinus) 12% e falha na linha de cola 63% |

Quadro 11. Análise visual dos testes de cisalhamento nos corpos de prova colados nos plano paralelo e perpendicular às fibras. Fonte: autor.

A análise visual da ruptura foi realizado de acordo com LOBÃO *et. al* (2006), após ensaio de ruptura, tanto a fratura profunda como a rasa, assim como a falha na linha de cola. Observou-se que, tanto o adesivo MUF como o adesivo UF mostraram maiores índices de fratura profunda com arrancamento de partes da madeira, principalmente nos planos de colagem paralelo às fibras.

Os resultados obtidos para as colagens no plano perpendicular às fibras foram os menos satisfatórios, com maior índice de fraturas rasas na madeira para os corpos de prova confeccionados com MUF e falha na linha de cola para os grupos eucalipto/eucalipto e pinus/eucalipto colados com o adesivo UF, como mostram os gráficos das figuras 52 e 53. Estes resultados indicam a maior resistência na linha de cola e absorção pela madeira do adesivo MUF, em comparação com a UF.

No entanto, resultados que foram observados na análise visual após os testes de cisalhamento nos corpos de prova com adesivo MUF, no plano perpendicular às fibras, mesmo sentido dos painéis CLT, foram mais expressivas as fraturas rasas, principalmente nos corpos de prova contendo pinus. As composições elaboradas com eucalipto apresentaram resultados mais elevados para fraturas profundas em comparação com os corpos de prova de pinus, mesmo tendo sido observado maior índice de falha na linha de cola, como mostram as figuras 54 e 55.

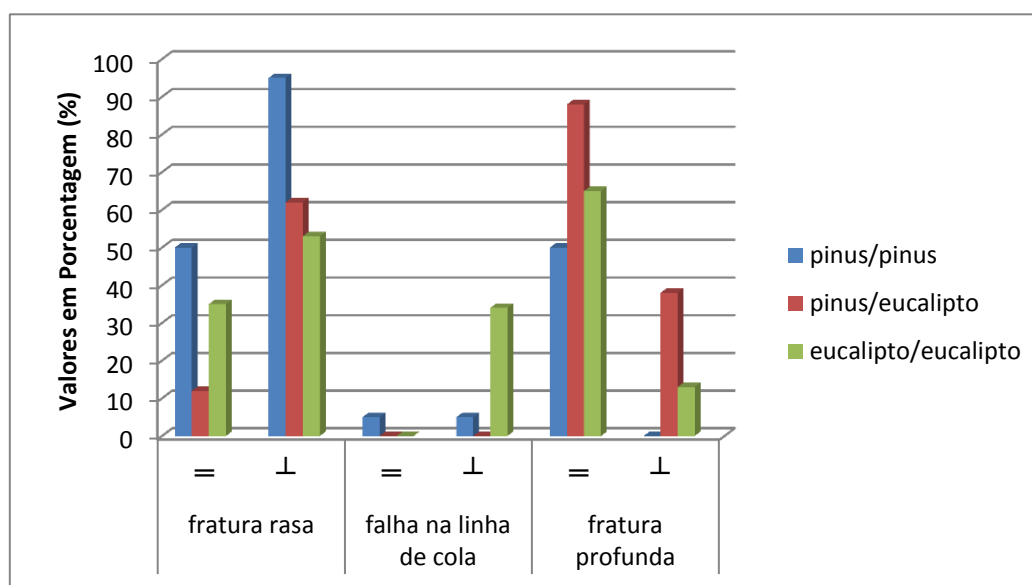


Figura 52. Gráfico com os resultados das colagens dos corpos de prova com adesivo MUF.
Fonte: autor.

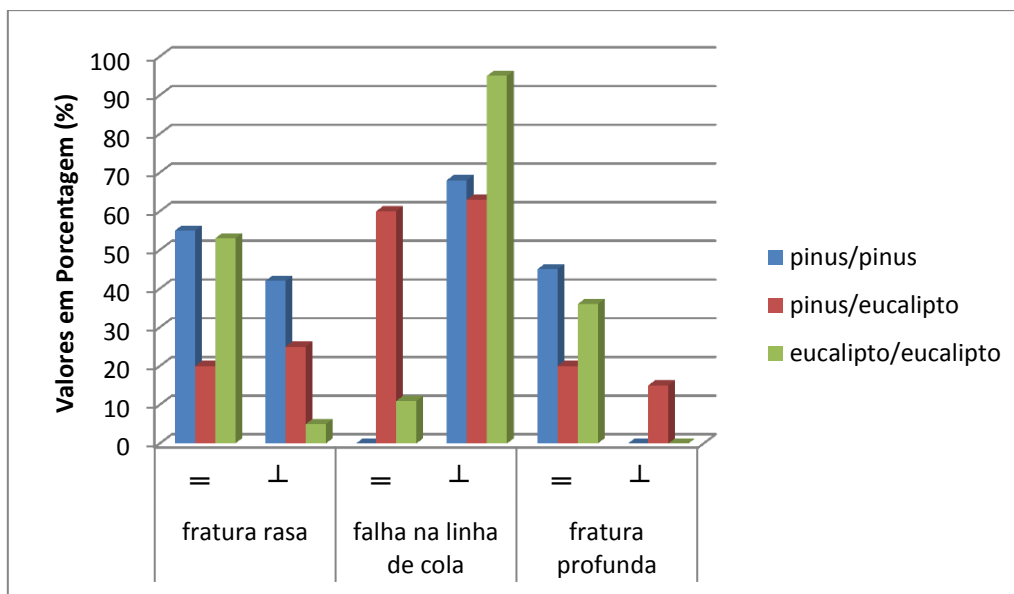


Figura 53. Gráfico com os resultados das colagens dos corpos de prova com adesivo UF.
Fonte: autor.



Figura 54. Corpos de prova com adesivo MUF. Fonte: autor



Figura 55. Corpos de prova com adesivo UF. Fonte: autor

A colagem de espécies diferentes, pinus e eucalipto, em todos os corpos de prova, com os dois adesivos, resultaram em fraturas rasas e profundas na

madeira de eucalipto, tanto no plano paralelo como no perpendicular às fibras. No entanto, a ocorrência de falha na linha de cola foi observada somente para os corpos de prova de pinus/eucalipto elaborados com o adesivo UF.

Estas observações se alinham com as da literatura, no estudo desenvolvido por SERPA *et al* (2003), observou-se menor porcentagem de falha rasas e profundas na madeira eucalipto, com falha na linha de cola em 70%. Para o pinus houve fratura na madeira em média 80%, resultados coerentes com o observados no estudo. Segundo LOBÃO *et al* 2006, elevadas porcentagens de falha na madeira indicam boa qualidade de adesão, no caso deste estudo, a madeira pinus.

4.5. RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS PAINÉIS.

Foram elaborados 16 painéis CLT, com 3 camadas e com 4 configurações distintas, dois tipos elaborados somente com pinus e eucalipto em todas as camadas (PPP) e (EEE) e outro dois tipos combinando as duas espécies (EPE) e (PEP). Mesmo sendo composto com a mesma combinação, existe a diferença entre os painéis de acordo com os grupos de módulo de elasticidade das peças que compõem estes painéis. Portanto, os resultados dos testes elaborados foram avaliados de forma qualitativa e comparados tanto com os valores obtidos entre os grupos e combinações, como com valores observados na literatura e na norma técnica específica para CLT (ANSI/APA 320 2012).

Os resultados obtidos nos testes de flexão e ruptura realizados nos 8 painéis CLT produzidos com pinus e eucalipto nas três camadas (PPP) e (EEE) e nos 8 painéis elaborados a partir da combinação entre estas espécies, com eucalipto nas extremidades e pinus no centro (EPE) e a série composta com eucalipto no centro e pinus nas camadas externas é demonstrado no quadro 11.

| Resultado de Módulo de Elasticidade (MOE) x Módulo de Ruptura (MOR) (MPa) | | | | | | | | |
|--|--------|-------|--------|-------|----------|-------|----------|-------|
| Painéis | EEE | | EPE | | PPP | | PEP | |
| | MOE | MOR | MOE | MOR | MOE | MOR | MOE | MOR |
| Grupo 1 | 17.333 | 38,43 | 16.895 | 39,05 | 14.131 | 43,72 | 15.566 | 67,69 |
| Grupo 2 | 16.069 | 40,57 | 18.362 | 37,73 | 13.499 | 58,78 | 13.073 | 58,10 |
| Grupo 3 | 15.318 | 37,44 | 16.730 | 39,64 | 11.974 | 37,01 | 12.883 | 68,33 |
| Aleatório | 15.815 | 34,28 | 16.910 | 39,36 | 14.884 | 53,94 | 10.693 | 32,58 |
| Média | 16.134 | 37,68 | 17.224 | 38,94 | 13.622 | 48,36 | 13.054 | 56,67 |
| Desvio Padrão | 743,21 | 2,27 | 660,67 | 0,73 | 1.070,37 | 8,52 | 1.725,84 | 14,49 |
| CV (%) | 4,6 | 6,0 | 3,8 | 1,9 | 7,9 | 17,6 | 13,2 | 25,6 |

Quadro 12. Resultados dos Ensaios nos Painéis CLT. Fonte: autor

Pode-se observar, no quadro 12 que houve diferenças significativas tanto entre os módulos de elasticidade como os valores de ruptura dos grupos dos painéis da combinação eucalipto/pinus/eucalipto (EPE) e eucalipto/eucalipto/eucalipto (EEE) em comparação com a combinação pinus/eucalipto/pinus (PEP). O maior valor de módulo de ruptura obtido neste grupo PEP (68,33 MPa) foi 50% maior que o menor resultado do grupo EEE (34,28 MPa), no entanto quanto ao módulo de elasticidade o grupo EPE mostrou um valor (18.362MPa) 70% maior que o menor resultado encontrado no grupo PEP (10.693MPa).

Estes resultados mostram que os painéis elaborados inteiramente com eucalipto e os com eucalipto e pinus na camada central foram mais rígidos, e no entanto romperam com uma carga inferior aos painéis elaborados com pinus/eucalipto/pinus. Neste grupo de composição PEP, o painel composto pelas peças sem classificação ou aleatório apresentou o menor resultado de todos os grupos, tanto para módulo de elasticidade (10.693 MPa) como para módulo de ruptura (32,58 MPa).

Nas combinações de painéis EEE, PPP e PEP, o módulo de elasticidade observados nos grupos foi decrescente do grupo 1 para o grupo 3, mantendo uma média para os grupos aleatórios, o que de certa forma era esperado, pois o grupo 1 é formado com peças de melhor classificação.

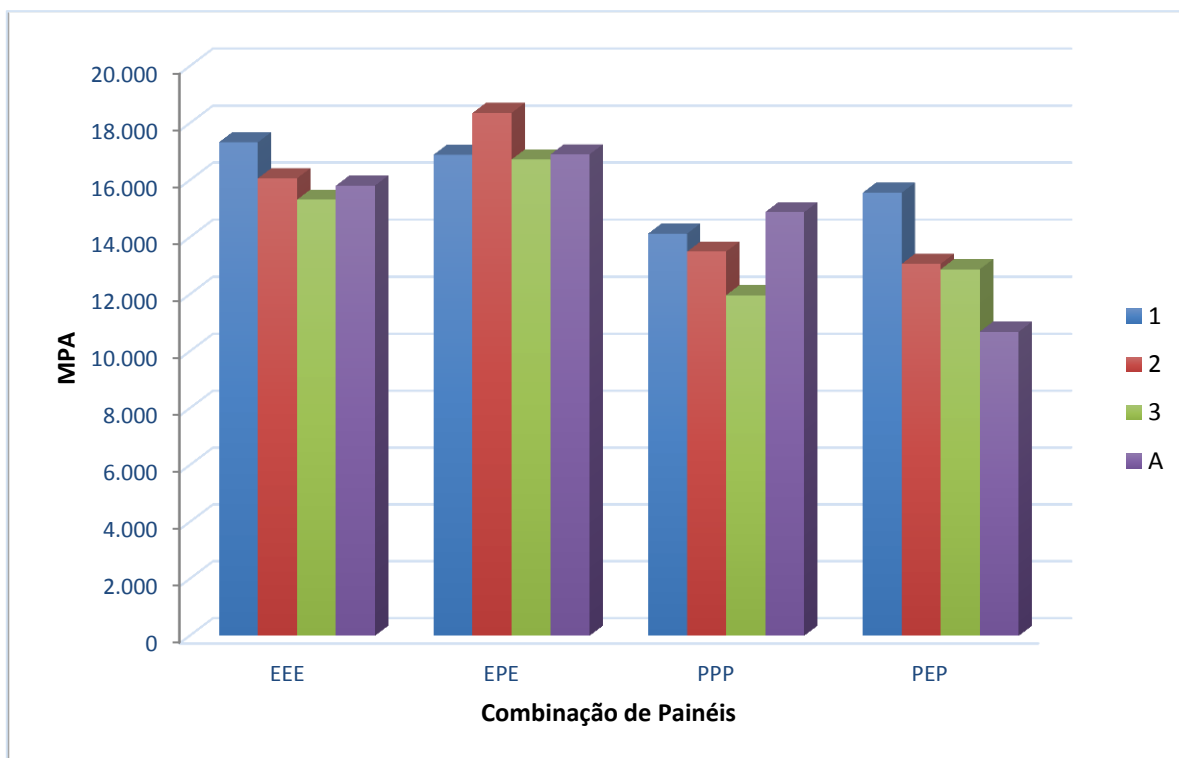


Figura 56. Resultados de Módulo de Elasticidade (MOE) dos Painéis CLT. Fonte: autor.

Conforme observado na figura 56, o grupo que apresentou os melhores resultados de módulo de elasticidade foi o formado por eucalipto/pinus/eucalipto ao contrário do grupo dos painéis elaborados inteiramente com pinus que apresentou valores mais baixos de módulo de elasticidade de todos os grupos e, no entanto, não apresentou os maiores valores de módulo de ruptura.

Estes valores de módulo de elasticidade observados nos painéis, tanto os compostos por eucalipto como os compostos por pinus e em comparação com os valores apresentados pelas peças que compuseram não superaram os maiores resultados da classificação por ultrassom (24.000 MPa para o pinus). No entanto o menor valor apresentado foi de 10.000 Mpa, ou seja, 258% maior que o valor do menor resultado individual das peças classificadas (2.793MPa para o pinus).

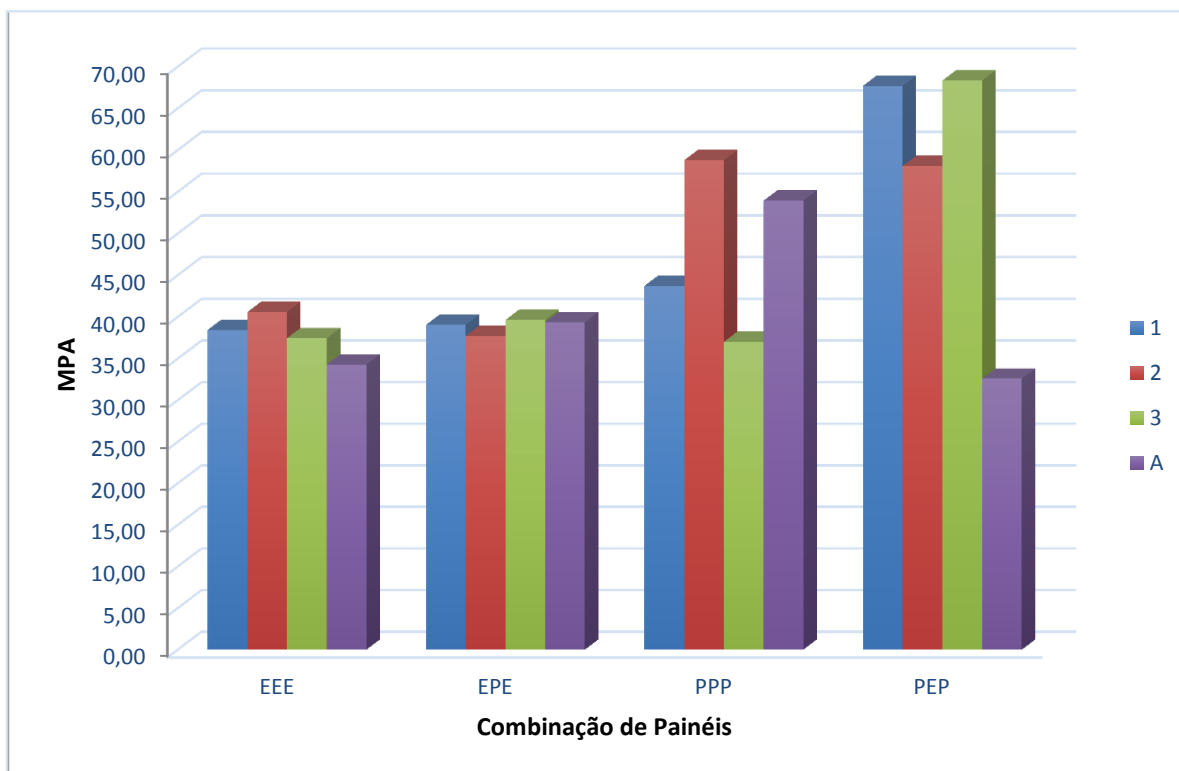


Figura 57. Resultados do Módulo de Ruptura (MOR) dos Painéis CLT. Fonte: autor.

Como pode ser observado na figura 57, os valores obtidos nos ensaios de ruptura dos painéis CLT mostraram menor variação para as combinações dos painéis EEE e EPE com médias entre 37 e 38 Mpa. Os painéis com pinus nas camadas externas e eucalipto no centro, mostraram os melhores resultados em ruptura (68,33 MPa). No entanto este grupo PEP, apresentou o mais alto índice de coeficiente de variação de todas as combinações de painéis CLT (25,6 %), devido ao valor observado do painel sem classificação (32,58 MPa), 50% menor que os demais painéis do mesmo grupo.

Na combinação de painéis CLT inteiramente com pinus, os resultados dos testes de ruptura foram divergentes das demais combinações de painéis. O grupo com a segunda melhor classificação de módulo de elasticidade das tábuas individuais usadas na composição mostrou o melhor resultado de MOR, seguido pelo painel elaborado com peças sem classificação. Na maioria das combinações, os resultados dos grupos sem classificação foram inferiores aos dos grupos elaborados com peças classificadas. Este fato ressalta a importância do processo de classificação, tanto visual como mecânica não destrutiva, como forma de melhoria do comportamento estrutural dos painéis.

Quanto a avaliação do resultado dos ensaios de ruptura, houve maiores diferenças entre os tipos de combinações de painéis, no entanto os grupos mostraram resultados semelhantes ao encontrados nos testes de cisalhamento realizados em corpos de prova colados no sentido perpendicular as fibras com adesivo MUF. Nos dois ensaios, os resultados tiveram valores de ruptura mais expressivos para as composições contendo pinus, porém, também apresentaram maiores incidências de falha na colagem.

A análise dos resultados obtidos para os testes de flexão e ruptura realizados nos painéis CLT, em comparação aos encontrados na revisão bibliográfica, mostrou que os valores alcançados neste trabalho foram similares como demonstra o quadro 13.

| Autores | Tipo da madeira | Densidade (g/cm³) | MOE (MPa) | MOR (MPa) |
|-----------------------------|---|--|------------------|------------------|
| CONCU et al (2014) | pinus | 0,49 | 7.913 | 26,1 |
| SIGRIST et al (2014) | <i>Pinus radiata</i> (sem classificação) | Não informado | 6.251 | 25,5 |
| | <i>Pinus radiata</i> (classificado visualmente) | Não informado | 8.066 | 35,4 |
| | <i>Pinus radiata</i> (classificação MGP12) | Não informado | 12.567 | 53,1 |
| WANG et al (2014) | <i>Pinus radiata</i> | 0,45 | 6.350 | 44,5 |
| | <i>Douglas fir</i> (sem defeito com finger joint) | 0,47 | 8.690 | 34,7 |
| | <i>Populus euroamericana</i> (sem defeito com finger joint) | 0,41 | 5.970 | 41,6 |
| FLAIG et al (2014) | Vigas CLT Sem finger joint (<i>Picea abies</i>) | 0,45 | 12.800 | 40 |
| | | 0,40 | 10.000 | 32 |
| STEIGER et al (2011) | C24/C20 | 0,42 (camada externa) 0,39 (camada interna) | 12.000/14.000 | - |
| ZHOU e CHUI (2014) | <i>Spruce-pine-fir</i> | 0,52 | 10.500 | - |
| ALENCAR (2015) | EEE | 0,51 | 16.134 | 37,7 |
| | EPE | 0,51/0,53 | 17.224 | 38,9 |
| | PPP | 0,53 | 13.622 | 48,3 |
| | PEP | 0,53/0,51 | 13.054 | 56,6 |

Quadro 13. Resumo comparativo dos resultados do estudo com a revisão bibliográfica.

Fonte: Autor

WANG *et al* (2014) obteve valores para módulo de ruptura entre 34 MPa e 41 MPa e para módulo de elasticidade entre 5.900 MPa a 8.700 MPa. FLAIG *et al* (2014), em testes de flexão e ruptura realizados em vigas CLT obtiveram valores médios para módulo de ruptura com madeira mais densa ($0,45 \text{ g/cm}^3$) e sem *finger joint* 40 MPa para MOR e para módulo de elasticidade de 12.800 MPa. Neste estudo, para madeira menos densa ($0,40 \text{ g/cm}^3$), os resultados obtidos foram de 32 MPa para módulo de ruptura e 10.000 MPa para módulo de elasticidade. STEIGER *et al* (2011) obtiveram resultados de valores para módulo de elasticidade entre 12.000 MPa a 14 MPa. Os autores ZHOU E CHUI (2014), em testes de flexão não destrutivos em painéis CLT obtiveram valores de módulo de elasticidade médio de 10.500 MPa.

No estudo realizado por SIGRIST e LEHMANN (2014) os testes de flexão e rigidez realizados com *Pinus radiata* sem classificação observou-se valores de módulo de ruptura de 25,5 MPa e módulo de elasticidade de 6.250 MPa. Para painéis elaborados com peças classificadas foi de 35 MPa para módulo de ruptura e 8.066 MPa para módulo de elasticidade. Em uma outra configuração utilizando madeira com melhores propriedades estruturais e classificadas, os resultados foram de 53MPa para módulo de ruptura e 12.500 MPa para módulo de elasticidade.

De acordo com os valores mínimos para projetos estruturais para painéis CLT editados pela norma ANSI/APA 320 (2012), os resultados para módulo de elasticidade não devem ser menores que 8.300 MPa e para módulo de ruptura 10 MPa. Estes valores são relativos a testes de flexão no sentido longitudinal, conforme a norma ASTM D198, mesma metodologia utilizada nos testes realizados neste estudo.

O que demonstra o quadro 13 é que os valores obtidos neste estudo foram superiores ou similares os estudos observados na literatura. Este fato comprova que mesmo os painéis elaborados com medula de eucalipto, matéria prima considerada não estrutural pela norma NBR 9487 (1986), os resultados obtidos foram superiores ao exigidos pela norma ANSI/APA 320 (2012).

4.6 MODOS DE RUPTURA NOS PAINÉIS CLT.

A seguir a discussão dos resultados de modos de ruptura obtidos nos testes dos painéis CLT.

4.6.1 Painéis Pinus/Pinus/Pinus

Os resultados obtidos nos testes de ruptura do grupo formado somente por pinus, como pode ser observados nas figuras 58, 59 e 60 apresentaram na maioria dos painéis o ponto de ruptura nas tábuas longitudinais localizadas na camada inferior. Nos locais onde se localizavam os nós próximos ao centro do painel, houve maior incidência de ruptura.

Assim como o resultado obtido nos ensaios de flexão em painéis CLT com 5 camadas realizado por CONCU *et al* (2013), as peças que continham nós nas região próxima ao centro do painel foram os locais onde ocorreram maiores incidências de colapso. Neste estudo os valores médios obtidos módulos de elasticidade foram 7.900 MPa e módulo de ruptura 26 MPa, ou seja, valores abaixo dos obtidos para as composições de painéis CLT contendo pinus, 46 MPa (PPP) e 56 MPa (PEP).

Este fenômeno foi observado nos painéis dos grupos 2, 3 e aleatório, fato que reforça a importância da classificação visual das peças que compõe o painel como forma de incremento da resistência global da peça. Esta observação alinha-se com as de CONCU *et al* (2013), que defeitos nas lâminas diminuem a resistência dos painéis, pelo fato da ruptura ocorrer no alinhamento dos nós.



Figura 58. Painel PPP grupo aleatório. Fonte: autor.



Figura 59. Painel PPP grupo 3, detalhe da ruptura no nó. Fonte: autor.



Figura 60. Painel PPP grupo 3. Fonte: autor

Nas combinações dos painéis formados por pinus, o painel do grupo 1 mostrou resultado diferente dos demais. Neste a ruptura ocorreu com a falha na linha de cola, o que demonstra baixa qualidade de adesão. Este resultado pode ter sido obtido devido possíveis degraus, defeito decorrente da operação de desengrosso, de 1 a 2 mm, entre as tábuas, o que pode causar falhas na linha de cola, como demonstra a figura 61. Esta é a razão provável pela qual neste painel não houve ruptura das tábuas.



Figura 61. Painel do PPP do grupo 1, detalhe da falha na linha de cola. Fonte: autor.

4.6.2 Painéis Pinus/Eucalipto/Pinus

Os resultados obtidos nos testes de ruptura para a combinação de espécies pinus/eucalipto/pinus, nos grupos 1 e aleatório houve ruptura nos pontos onde haviam nós nas tabuas localizadas na camada inferior, assim como ocorreu na combinação dos painéis elaborados somente de pinus (figura 62). Apesar do resultado de MOR semelhante entre estes dois painéis, o valor de módulo de ruptura do painel do grupo 1 foi o 53% maior que o valor obtido no teste do painel composto por peças sem classificação ou aleatório.

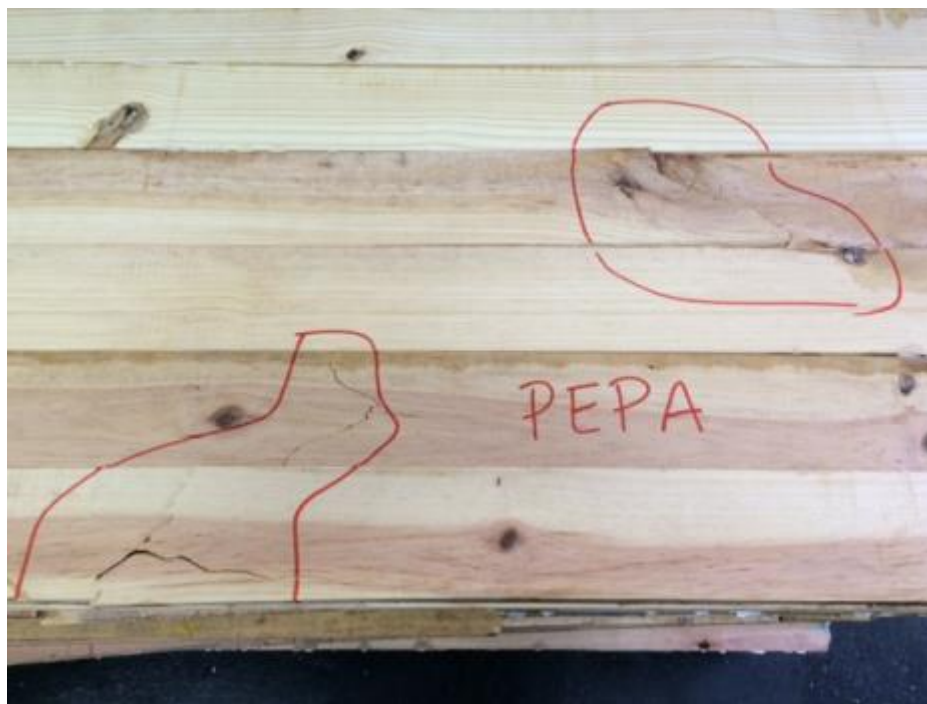


Figura 62. Painel PEP grupo aleatório. Fonte: autor.

Nos painéis dos grupos 3 e 2 houve ruptura em todas as camadas dos painéis (figura 63, 64). Observa-se que estes painéis apresentaram valores altos de módulo de ruptura 68 MPa e 58 MPa. Pode-se observar através da figura 48, que o painel do grupo 2 apresentou também falha na linha de cola na última camada das tábuas longitudinais. Este fato possivelmente diminuiu a resistência do painel do grupo 2, em comparação aos valores do grupo 3 que mostrou valores superiores mesmo sendo composto por peças com classificação inferiores ao do grupo 2.

Estes painéis das combinações compostas com pinus nas camadas externas (PEP), apresentaram médias altas de MOR: 48 MPa para o painel composto somente de pinus (PPP) e 56 MPa para que o que contém eucalipto na camada transversal (PEP). No entanto, os valores médios dos módulos de elasticidade para estas duas composições (PEP e PPP) foram baixos se comparados com os valores médios das outras composições (EEE e EPE) o que caracteriza painéis elaborados com pinus menos rígidos com maiores deformações, em comparação aos painéis compostos por eucalipto nas camadas externas.



Figura 63. Painel PEP do grupo 3. Fonte: autor.



Figura 64. Painel PEP do grupo 2. Fonte: autor.

4.6.3 Painéis Eucalipto/Pinus/Eucalipto.

Os resultados dos testes de ruptura obtido nos painéis da composição eucalipto/pinus/eucalipto dos grupos 2, 3 e aleatório apresentaram ruptura nas tábuas localizadas na camada externa inferior dos painéis. Como as peças de medula de eucalipto foram selecionadas com maior eliminação de defeitos, estas rupturas em algumas tábuas ocorreram nos nós aparentes próximos ao centro do painel (figuras 65, 66 e 67).



Figura 65. Painel EPE do grupo aleatório. Fonte: autor.



Figura 66. Painel EPE do grupo 2. Fonte: autor.

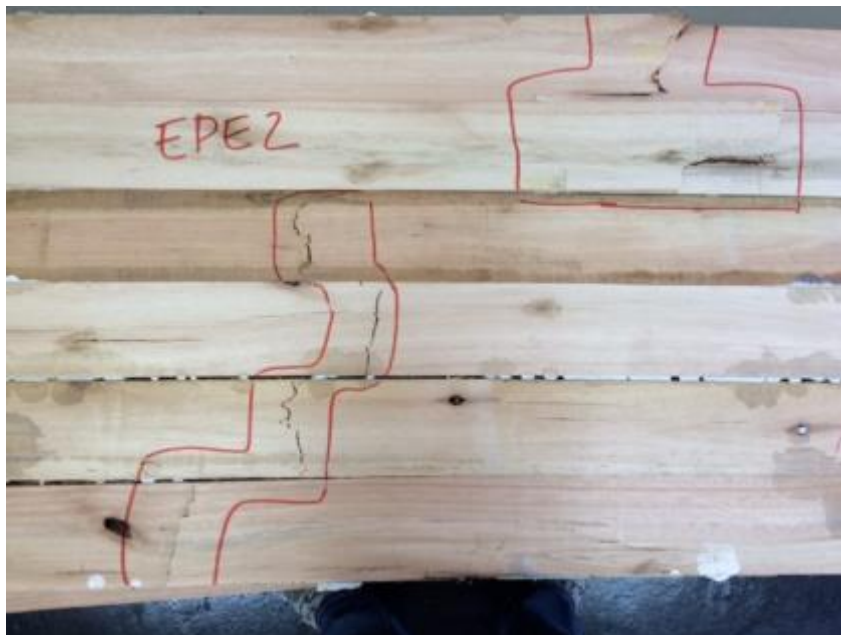


Figura 67. Painel EPE do grupo 2. Fonte: autor.

No painel EPE do grupo 1 a ruptura ocorreu por falha na linha de cola, como mostram as figuras 68 e 69. Em relação aos valores de módulo de ruptura, não houve diminuição em relação aos painéis dos demais grupos da mesma combinação, porém, como é o painel formado por peças com melhor classificação, este resultado obtido poderia ter sido maior que 39 MPa.



Figura 68. Painel EPE do grupo 1. Fonte: autor.

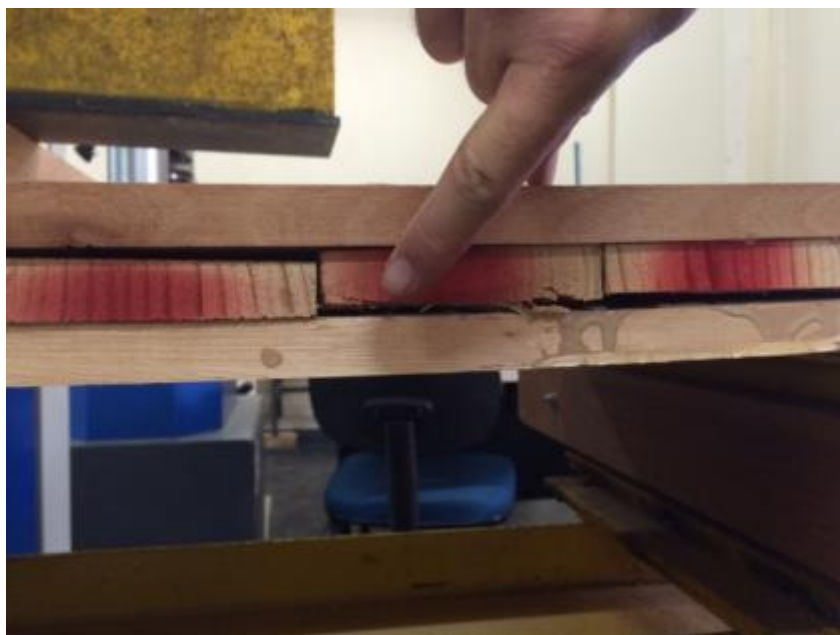


Figura 69. Painel EPE do grupo 1. Fonte: autor.

4.6.4 Painéis Eucalipto/Eucalipto/Eucalipto

Os resultados das combinação com três camadas de eucalipto EEE demonstraram que a ruptura ocorreu nas tábuas longitudinais da camada externa inferior do painel. Estas rupturas em alguns casos ocorreram em nós localizados próximo ao centro do painel, como mostra a figura 72. No entanto, a maioria destas rupturas ocorreu distante dos nós, mesmo os que se localizavam nas proximidades do centro do painel (figuras 70 e 71).

Os valores médios obtidos nestas combinações foram 37 MPa para módulo de ruptura e 16.000 MPa para módulo de elasticidade, ou seja resultaram em painéis mais rígidos e menos resistentes, nos quais os nós não influenciaram tanto na resistência quanto nas combinações contendo pinus.

Quanto a qualidade da adesão, nestes painéis elaborados somente com eucalipto, não houve falha na linha de cola em nenhum dos grupos. Este fato pode apontar para uma melhor colagem em comparação aos painéis elaborados com eucalipto nas extremidades e pinus na camada transversal, os quais apresentaram valores de MOE e MOR semelhantes aos painéis CLT de eucalipto em todas as camadas.



Figura 70. Painel EEE grupo aleatório. Fonte: autor.



Figura 71. Painel EEE grupo 3. Fonte: autor.



Figura 72. Painel EEE grupo 1. Fonte: autor.

De forma geral em relação aos testes de ruptura, a qualidade da colagem dos painéis se alinhou aos resultados apresentados pelos testes de cisalhamento elaborados nos corpos de prova de colagem. As combinações de painéis que continham peças de pinus apresentaram maiores valores médios de ruptura em comparação aos corpos de prova elaborados com eucalipto, no entanto, esses mesmos painéis apresentaram maiores índices de fraturas rasas, o que pode indicar maior absorção do adesivo MUF pelas peças de eucalipto nos quais se observaram melhores resultados de fratura profunda.

5 CONCLUSÃO

A classificação visual realizada demonstrou que na madeira de pinus foi observado um percentual maior de peças em classes superiores, enquanto o eucalipto apresentou peças com classificação inferior, principalmente por serem compostas na sua maioria por medula, que apresenta características estruturais inferiores ao lenho maduro. No entanto alguns dos defeitos visuais como nós, rachaduras e fendas foram eliminados após serem realizados cortes e aparelhamento final nas peças, para que se enquadrem na dimensão determinada dos painéis CLT de 180 cm x 60 cm.

Evidenciou-se a coerência entre os resultados obtidos nos testes de classificação visual e não destrutiva, realizados nas peças de pinus e eucalipto com os encontrados na literatura. Os valores encontrados para a medula do eucalipto, mostraram-se abaixo dos estudos encontrados na literatura, em comparação com eucalipto maduro, o que em hipótese era esperado, tendo em vista estudos que demonstram baixa resistência em lenho juvenil e peças oriundas da área central da tora.

Os valores de $MOE_{estático}$ e $MOE_{dinâmico}$, assim como o coeficiente de determinação R^2 , obtidos para a relação entre o $MOE_{estático}$ e $MOE_{dinâmico}$, em comparação com a revisão bibliográfica foram coerentes, levando-se em consideração as especificidades de cada espécie estudada. Deste modo, a utilização da técnica não destrutiva ultrassom que determinou os valores de $MOE_{dinâmico}$ possibilitou o agrupamento das peças de pinus e eucalipto como referência para a organização dos grupos de painéis.

Os resultados obtidos para a colagem em corpos de prova confeccionados com pinus e eucalipto, colados com adesivos MUF e UF em planos paralelos e perpendiculares às fibras da madeira, indicam que o adesivo MUF mostrou melhor desempenho em relação ao adesivo UF. Os resultados obtidos neste trabalho mostraram coerência entre aqueles encontrados na literatura. Os valores de cisalhamento para a colagem nos corpos de prova mostraram que a influência da direção do plano de colagem foi mais importante que o tipo de adesivo utilizado. Este resultado fica evidente comparando-se os valores médios de todos os

grupos de corpos de prova pinus/pinus, eucalipto/eucalipto e pinus/eucalipto, colados nos planos paralelos e colados no plano perpendicular às fibras da madeira. A comparação dos valores obtidos nos testes de cisalhamento comprovaram a superioridade do MUF em relação à UF, variando entre 12% a 46%.

O adesivo MUF mostrou melhor qualidade de adesão também a partir da análise visual das fraturas nos corpos de prova para todos os grupos analisados. Houve maiores fraturas rasas e falha na linha de cola, principalmente nas composições de corpos de prova com eucalipto utilizando o adesivo UF, o que corrobora a hipótese de uma maior absorção de adesivo pela madeira com maior porosidade, no caso o pinus. Quanto às falhas na linha de cola, maiores índices foram obtidos nos corpos de prova com UF, principalmente nos grupos eucalipto/eucalipto colados no plano perpendicular às fibras. Neste mesmo grupo, corpos de prova colados com MUF, apresentaram fraturas profundas, evidenciando uma melhor penetração do adesivo MUF em relação ao adesivo UF.

Os resultados alcançados nos ensaios de flexão nos 16 painéis CLT mostraram valores acima dos referenciados na literatura e da norma que regulamenta o CLT. Os painéis elaborados com pinus apresentaram melhores valores de MOR, no entanto menores valores de MOE, ou seja, os painéis com pinus foram mais resistentes e menos rígidos que os elaborados com eucalipto.

Nas combinações entre as espécies, os painéis que continham pinus nas camadas longitudinais e eucalipto nas camadas transversais (PEP) apresentaram os melhores resultados médios para MOR (56,67 MPa) e os valores médios menores para MOE (13.034 MPa). Os painéis com eucalipto nas camadas longitudinais e pinus na camada transversal (EPE) apresentaram valores de 38,94 MPa para MOR e 17.224 MPa para MOE. Portanto, uma diferença de 33% a mais para o grupo PEP para MOR enquanto que em relação ao MOE a diferença foi de 15% a mais para EPE. Estes resultados apontaram para uma maior rigidez e menor resistência para os painéis elaborados com eucalipto, (EEE e EPE) enquanto os que continham pinus (PPP e PEP) apresentaram maior flexibilidade e resistência.

A qualidade da colagem dos painéis mostrou resultado coerentes com os resultados apresentados pelos testes de cisalhamento elaborados nos

corpos de prova. As combinações de painéis CLT que continham peças de pinus apresentaram maiores valores médios de ruptura em comparação ao painéis elaborados com eucalipto. Os painéis com pinus apresentaram maiores índices de fraturas rasas indicando menor absorção do adesivo MUF em relação aos painéis elaborados com eucalipto os quais obtiveram melhores resultados de fratura profunda.

Na maioria das combinações, os resultados dos grupos sem classificação foram inferiores aos dos grupos elaborados com peças classificadas. No entanto em alguns resultados os valores de MOE e MOR foram superiores, pois em hipótese, poderiam estar contidos nestes painéis tábuas com valores elevados de $MOE_{dinamico}$. Este fato ressalta a importância do processo de classificação, tanto visual como mecânica não destrutiva, como forma de melhoria do comportamento estrutural dos painéis, assim como também na segurança da utilização estrutural destes painéis.

Portanto os valores alcançados no estudo realizado, mesmo os menos expressivos alcançaram valores médios similares aos encontrados na literatura, assim como, acima dos valores mínimos editados pela norma ANSI/APA 320 (2012). Desta forma observou-se que medula do eucalipto, matéria prima considerada imprópria para uso estrutural pela norma NBR 9487 alcançou valores aceitáveis para MOE e MOR na composição de painéis CLT, mostrando-se que realmente existe a viabilidade técnica na utilização deste material com baixo valor agregado na elaboração de painéis estruturais CLT.

6 POSSIBILIDADE DE FUTUROS ESTUDOS

- Estudo da interação entre a colagem e tratamento contra ataque de insetos para na medula de eucalipto devido a presença do amido;
- Testes de cisalhamento em painéis CLT;
- Testes em painéis CLT com ligações finger joint;
- Estudo de Painéis CLT com maiores dimensões;

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **ASTM D 4761 - Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material**, Philadelphia, 2002, 10 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **ASTM D 245 - Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material**, Philadelphia, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **ASTM D 905 - Standard Test Methods for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading**, Philadelphia, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **ASTM D 198 - Standard Test Methods for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading**, Philadelphia, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira**, Rio de Janeiro, 1997, 107 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **NBR 9487 – Classificação de Madeira Serrada de Folhosas**, Rio de Janeiro, 1986, 32 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **NBR 11700 – Madeira serrada de coníferas proveniente de reflorestamento para uso geral**, Rio de Janeiro, 1990, 6 p.
- APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. STANDARD FOR PERFORMANCE – **Rated Cross-Laminated Timber, ANSI/APA PRG 320**. Tacoma, Washington, USA. 2011.
- BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. **Determinação do Módulo de Elasticidade da Madeira Juvenil e Adulta de Pinus taeda por Ultrassom**. Eng. Agric. Jaboticabal, v. 25, n,1, p. 19-28, jan/abr. 2005.
- BARTHOLOMEU, A. **Classificação de Peças Estruturais de Madeira Através do Ultra-som**, 2001. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas-Sp, 2001.
- CANDIAN, M.; SALES, A. **Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira**. Ambiente Construído, v. 9, n. 4, p. 83-98, out/dez. Porto Alegre, 2009.

- CANDIAN, M. **Estudo da Classificação Não-Destrutiva de Peças Serradas de Espécies Cultivadas no Brasil para uso em Estruturas**. 2007. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.
- CARDIN, V. S. **Ensaaios não destrutivos aplicados a madeira serrada e estruturas: Técnicas potenciais para uso no Brasil**. 2011. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.
- CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. **Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do método norte-americano às espécies de *Pinus sp* plantadas no Brasil**. Scientia Forestalis n. 67, p. 78-87, abr. 2005.
- CONCU, G.; DE NICOLO, B.; VALDÉS, M.; FRAGIOCOMO, M.; MENIS, A.; TRULLI, N. **Experimental Grading of Locally Grown Timber to be used as Structural Material**. Revista Advances in Civil Engineering and Building Material, Londres, 2013.
- CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. **Determinação do módulo de Elasticidade em Madeira Laminada Colada por Meio de Ensaio não destrutivo (“Stress Wave Timer”)**. Revista Arvore, v.34, n.2, p. 345-354, 2010. Viçosa-MG.
- CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. **Estimativa do módulo de Elasticidade em Vigas Laminadas Coladas pelos Métodos Estático e Dinâmico**. Floresta , Curitiba Pr, v.41, n.1, p. 97-112, jan/mar 2011.
- FIORELLI, J.; DIAS, A. A.; COIADO, B. **Propriedades Mecânicas de Peças com Dimensões Estruturais de *Pinus spp*: Correlação entre Resistência à Tração e Classificação Visual**. Scielo, Viçosa-MG, v.33, n.4, p. 741-750, 2009.
- FLAIG, M.; BLAD, H. J. **Bending Strength of Cross Laminated Timber Beams Loaded in Plane**. 2014. World Conference on Timber Engineer, Quebec-City, Canadá, **Anais**.
- FPINNOVATIONS. **CLT Handbook : Cross laminated timber**. FPInnovations Canadá. 2011.
- GORNIK, E.; MATOS, J. L. K. **Método não destrutivos para determinação e avaliação de propriedades da madeira**. 2000. VII Encontro Brasileiro em Estruturas de Madeira, São Carlos, **Anais**.
- JORGE, L. F. C. **Edifícios Construídos com Painéis de Madeira lamelada-colada cruzada (X-Lam)**. Seminário de Casas de Madeira, Lisboa-Portugal, P. 103-116, 2013. **Anais**.
- LOBÃO, M. S.; GOMES, A. **Qualidade da Adesão de Madeira de Eucalipto em**

- corpos-de-prova colados em dois diferentes Planos de Densidades**, 2006, Cerne, Lavras, v. 12, n.2, P. 194-200, abr./jun. 2006
- KLH Massivholz GmbH, **Component Catalogue for Cross Laminated Timber Structures**, 2011.
- MATOS, J. L. M. **Estudos Sobre a Produção de Painéis Estruturais de Lâminas Paralelas de *Pinus taeda* L.**, 1997. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Paraná, Pós-graduação em Engenharia Agrária, Curitiba-Pr, 1997.
- MOURA, J. D. M.; PLETZ, E.; STRASS, M. C. **Panorama Geral e Perspectivas Preliminares de Continuidade dos Trabalhos em Relação às Visitas Técnicas Realizadas a Indústria do Setor Madeireiro do Parque Industrial de Telêmaco Borba a Convite da Secretaria Municipal do Trabalho e Indústria Convencional**. 2012, Universidade Estadual de Londrina, Relatório Interno.
- MOURA, J. D. M.; PLETZ, E.; STRASS, M. C. **Qualidade e Processo Produtivo da Madeira para Utilização em Mobiliário**. 2012. Universidade Estadual de Londrina, Edição 1.
- OLIVEIRA, F. G. R. **Estudo de Propriedades Mecânicas de Dicotiledoneas por meio de ensaios não destrutivos utilizando equipamento de Ultrassom**. 2001, Dissertação (Mestrado) – EESC, USP, São Carlos.
- OLIVEIRA, F. G. R.; CANDIAN, M.; LUCCHETTE, F. F.; CALIL JUNIOR, C.; SALES, A. Avaliação de propriedades mecânicas de madeira por meio de Ultrassom. Pan American Conference for Non Destructive Testing, Vol. 3, 2003, Rio de Janeiro, **Anais**.
- PASSARELI, R. N. **Cross Laminated Timber: Diretrizes para Projeto de Painel Maciço em Madeira no Estado de São Paulo**. 2013, Dissertação (Mestrado)- Universidade de São Paulo. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. São Carlos-SP.
- RIVERA, C. S. **Expanding Opportunities for Mid-Rise Buildings in Chile Through the application of Timber Panel Systems**. 2012, (Master of Advanced Studies in Architecture) University of British Columbia – Vancouver, 2012.
- SANTOS, A. M. L. **Avaliação Teórica e Experimental de Vigas em “I” Pré-fabricadas em Madeira com Flange de Painéis de Lâminas Paralelas (LVL) e Alma de Painéis de Partículas Orientadas (OSB) e Compensado**. 2008, Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Florestal. DF- Brasil.

- SERPA, P. N.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; PIMENTA, A. S. **Avaliação de Algumas Propriedades da Madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*.** Revista Árvore, v. 27, n.5, p. 723-733, Viçosa-MG, 2003.
- SIGRIST, C.; LEHMANN, M. Potential of CLT Produced from Non-Structural Grade Australian *Pinus Radiata*, Word Conference on Timber Engineering, Quebec City- Canadá, 2014. **Anais.**
- STEIGER, R.; GÜLZOW, A.; CZADERSKI, C.; HOWALD, M. T.; NIEMZ, P. **Comparison of bending stiffness of cross-laminated solid timber derived by modal analysis of full panels and by bending tests of strip-shaped specimens.** European Journal of Wood and Wood Products, v. 70 p. 141-153, Berlim-Alemanha, 2011.
- TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. **Avaliação do Módulo de Elasticidade da Madeira com uso de Método Não-Destrutivo de Vibração Transversal.** En. Agric., , v. 25, n2, p. 291-299, Jaboticabal-SP, 2005.
- VITAL, R.B.; MACIEL, A.S.; LUCIA, R.M.D; **Qualidade de Juntas coladas com Lâminas de Madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*,** 2006, Revista Árvore, Viçosa- MG, v.30, n.4, p. 637-644.
- WANG, Z.; FU, H.; CHUI, Y.; GONG, M. Feasibility of Using Poplar as Cross Layer to Fabricate Cross-Laminated Timber. 2014. World Conference on Timber Engineer, Quebec-City, Canadá, **Anais.**
- ZHOU, J.; CHUI, Y. Efficient Measurement of Elastic Constants of Cross Laminated Timber using Modal Testing. 2014. World Conference on Timber Engineer, Quebec-City, Canadá, **Anais.**