

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUIZ FERNANDO ELY

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE LIGAÇÕES COLADAS DE MADEIRA

TOLEDO

2021

LUIZ FERNANDO ELY

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE LIGAÇÕES COLADAS DE MADEIRA

Shear strength of glue timber connections

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris

TOLEDO

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUIZ FERNANDO ELY

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE LIGAÇÕES COLADAS DE MADEIRA

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 03/dezembro/2021

Gustavo Savaris
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rodny Jesus Mendoza Fakhye
Doutor em Métodos Numéricos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fernando Nunes Cavalheiro
Mestre em Ciências Ambientais
Universidade Paranaense

TOLEDO

2021

RESUMO

ELY, L. F. **Resistência ao Cisalhamento de Ligações Coladas de Madeira.** 2021. 53 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2021.

O presente trabalho avalia a resistência ao cisalhamento na linha da cola ligações de madeira coladas, confeccionadas com a utilização das espécies *Eucalyptus urograndis* e *Pinus* sp. e adesivo à base de óleos vegetais. Os resultados obtidos com a realização dos ensaios demonstram que as variações nas concentrações de adesivo utilizada na execução da junta, bem como a espécie de madeira adotada, não levaram à uma diferença significativa na resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira apresentada nas juntas coladas, ocorrendo para a madeira de *Eucalyptus urograndis*, inclusive, uma resistência ao cisalhamento na junta colada superior em comparação à peça maciça da mesma espécie. Confirma-se, assim, as vantagens encontradas na literatura existente em relação à utilização das ligações coladas e espera-se que estudos como esse incentivem a utilização dessa tecnologia, e o desenvolvimento de outras, na execução de elementos estruturais e outras áreas da construção civil.

Palavras-chave: Madeira laminada colada; Cisalhamento; Estruturas; Adesivo vegetal; Ligação..

ABSTRACT

ELY, L. F. **Shear strength of glue timber connections**. 2021. 53 p. Undergraduate degree - Civil Engineering Course, Federal University of Technology - Paraná, Toledo, 2021.

The present work evaluates the shear strength at the glue line of glued wood joints made using the species *Eucalyptus urograndis* and *Pinus* sp. and vegetable oil-based adhesive. The results obtained from the tests show that the variations in the concentrations of adhesive used in the execution of the joint, as well as the wood species adopted, did not lead to a significant difference in shear strength parallel to the wood fibers presented in the glued joints, occurring for the *Eucalyptus urograndis* wood, even a higher shear strength in the glued joint in relation to the solid piece of the same species. This confirms the advantages presented by the existing literature regarding the use of glued wood joints and it is expected that studies like this will encourage the use of this technology, and the development of others, in the execution of structural elements and other areas of civil construction.

Keywords: Glue laminated timber; Shear; Structures; Vegetal adhesive; Connection..

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Eucalyptus urograndis</i>	17
Figura 2 - <i>Pinus taeda</i>	18
Figura 3 – Exemplos das madeiras de <i>Pinus</i> sp. (esquerda) e <i>Eucalyptus urograndis</i> (direita)	26
Figura 4 - IMPERVEG® AGT 1315	27
Figura 5 - Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras	29
Figura 6 - Ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras	30
Figura 7 - Corpo de prova para ensaio de cisalhamento na linha da cola, com dimensões em mm	31
Figura 8 - Gráficos <i>boxplot</i> da resistência ao cisalhamento na linha da cola para os tratamentos com concentração de adesivo de 150 g/m ² , 200 g/m ² e 250 g/m ²	39
Figura 9 - Corpo de prova rompido após o ensaio de cisalhamento na linha da cola	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teor de umidade da madeira no momento da colagem (%).....	34
Tabela 2 - Teor de umidade da madeira no momento da ruptura (%).....	35
Tabela 3 – Densidade básica da madeira, em g/cm ³	35
Tabela 4 – Caracterização mecânica da madeira de <i>Eucalyptus urograndis</i>	36
Tabela 5 - Caracterização mecânica da madeira de <i>Pinus</i> sp.	37
Tabela 6 - Resistência ao cisalhamento na linha da cola	38
Tabela 7 - Comparação entre os resultados das espécies para a mesma concentração do adesivo	42
Tabela 8 – Comparação entre a resistência das peças coladas e maciças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	43
Tabela A-1 - Teor de umidade no momento da colagem das pelas de <i>Eucalyptus urograndis</i>	52
Tabela A-2 - Teor de umidade no momento da ruptura das pelas de <i>Eucalyptus urograndis</i>	52
Tabela A-3 - Resistência à compressão paralela às fibras das peças maciças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	53
Tabela A-4 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras das peças maciças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	53
Tabela A-5 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em ligações de madeira coladas de <i>Eucalyptus urograndis</i> com concentração de adesivo de 150 g/m ²	54
Tabela A-6 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em ligações de madeira coladas de <i>Eucalyptus urograndis</i> com concentração de adesivo de 200 g/m ²	54
Tabela A-7 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em ligações de madeira coladas de <i>Eucalyptus urograndis</i> com concentração de adesivo de 250 g/m ²	55
Tabela A-8 - Densidade básica da madeira de <i>Pinus</i> sp.....	55
Tabela A-9 - Teor de umidade no momento da colagem das pelas de <i>Pinus</i> sp.	56

Tabela A-10 - Teor de umidade no momento da ruptura das pelias de <i>Pinus</i> sp.	56
Tabela A-11 - Resistência à compressão paralela às fibras das peças maciças de <i>Pinus</i> sp.	57
Tabela A-12 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras das peças maciças de <i>Pinus</i> sp.	57
Tabela A-13 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em ligações de madeira coladas de <i>Pinus</i> sp. com concentração de adesivo de 150 g/m ²	58
Tabela A-14 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em ligações de madeira coladas de <i>Pinus</i> sp. com concentração de adesivo de 200 g/m ²	58
Tabela A-15 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em ligações de madeira coladas de <i>Pinus</i> sp. com concentração de adesivo de 250 g/m ²	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo geral	12
1.2.2	Objetivos específicos	12
1.3	Delimitação da pesquisa	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	A madeira na construção civil	14
2.2	<i>Eucalyptus urograndis</i>	16
2.3	<i>Pinus sp.</i>	17
2.4	Madeira laminada colada (MLC)	19
2.5	Estado da arte	20
2.5.1	Segundinho <i>et al.</i> (2015)	20
2.5.2	Segundinho <i>et al.</i> (2017)	21
2.5.4	Segundinho <i>et al.</i> (2018)	22
2.5.5	Biazzon <i>et al.</i> (2019)	22
2.5.6	Faria <i>et al.</i> (2019).....	23
2.5.7	Rosa <i>et al.</i> (2020).....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Madeiras	25
3.2	Adesivo	27
3.3	Caracterização das madeiras	28
3.3.1	Determinação do teor de umidade	28
3.3.2	Determinação da densidade básica	28
3.3.3	Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.....	29
3.3.4	Ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras	30

3.4	Ligações coladas	31
3.5	Análise dos resultados	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	Caracterização da madeira	34
4.1.1	Caracterização física	34
4.1.2	Caracterização mecânica	36
4.2	Ligações coladas	38
4.3	Análises estatísticas	41
5	CONCLUSÕES	44
5.1	Trabalho futuros	46
	REFERÊNCIAS.....	47
	APÊNCICE A - RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	53

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma enorme gama de espécies de madeira, o que, aliado a alguns fatores, tende a gerar boas reservas deste material. Entretanto, apesar do grande potencial, quando comparadas com outros tipos de materiais, as construções que se utilizam de estruturas de madeira existem em números consideravelmente baixos (MEIRELLES, 2007).

Júnior, Silva e Soares (2017) afirmam que diversos motivos podem levar ao cenário encontrado atualmente. Dentre esses, pode-se identificar o investimento prioritário do mercado da construção civil em estruturas que utilizam tecnologias voltadas ao concreto e o aço, em detrimento das estruturas de madeira. Os autores também afirmam que o desenvolvimento de novas tecnologias pode voltar a evidenciar a madeira como um material atrativo e impulsionar sua utilização nas mais diversas estruturas em uma construção. Entretanto, para a maior expansão deste setor, é necessário a realização de estudos visando a determinação do desempenho das novas técnicas desenvolvidas.

Conforme citado por Zenid (2009), deve-se buscar, também, a preservação da vegetação nativa, tendo em vista que a utilização das madeiras provenientes de dessas florestas acarreta a sua conseqüente escassez. Com o intuito de preservar a vegetação original, realizou-se o plantio de algumas áreas do território brasileiro, e dentre as espécies que atualmente compõem a maior parte das florestas plantadas, pode-se citar o eucalipto (*Eucalyptus sp.*) e o pinus (*Pinus sp.*), que serão abordados nesse trabalho, sendo que ambas representam atualmente a maior parte do fornecimento de matéria prima para as indústrias madeireiras.

Portanto, percebe-se cada vez mais a evidência da questão ambiental, sobretudo no Brasil. Tal fato acaba influenciando significativamente na busca pela utilização de materiais que possuam um impacto menor no meio ambiente. É nesse cenário que surge a aplicação das madeiras de florestas plantadas como uma opção viável de material para componentes estruturais no âmbito da construção civil (LOURENÇO *et al.*, 2013).

Ademais, vários outros fatores apontam a madeira como ótima escolha para ser utilizada estruturalmente, dentre os quais pode-se citar: a ótima relação de resistência e peso, superando o aço e o concreto nesses quesitos; isolamento

térmico e acústico; baixo custo; alta versatilidade; entre outros (SOUTO; BUENO; SILVA, 2016).

Indo ao encontro da necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias para aplicação da madeira na construção civil está a madeira laminada colada (MLC). Os elementos de MLC são compostos por peças unidas com a aplicação de um adesivo, proporcionando a possibilidade de fabricação de elementos de dimensões variadas e adequados para cada tipo de uso (SEGUNDINHO *et al.*, 2017).

É perceptível a necessidade de estudos acerca de como determinados gêneros e espécies de madeira interagem com cada adesivo, buscando determinar as melhores combinações desses elementos, e atestar o procedimento mais adequado a ser utilizado em cada um dos casos. São crescentes os estudos, tecnologias e pesquisas desenvolvidas envolvendo os adesivos, visando elencar aqueles que melhor se adaptam ao sistema da MLC (MACIEL, 2010).

Portanto, tendo em vista todos os fatores supracitados, buscou-se, neste trabalho, a análise do desempenho das ligações coladas utilizando espécies de madeiras de replantio. Para isso, avaliou-se a qualidade das juntas em ligações realizadas com peças de *Eucalyptus urograndis* e *Pinus* sp. em relação à resistência ao cisalhamento na linha da cola.

1.1 Justificativa

A madeira maciça legal, sobretudo em grandes dimensões, se torna, cada dia mais, um material de difícil acesso, devido a diversos fatores, como, por exemplo, o grande desmatamento das florestas nativas e questões ambientais em evidência que envolvem a sua obtenção. Dito isso, a madeira laminada colada surge como um método para composição de peças com as mais variadas dimensões, contornando assim a necessidade de obtenção de peças de madeira maciça e corroborando com a diminuição do desmatamento no país (SEGUNDINHO *et al.*, 2017).

Visando um projeto estrutural de engenharia, é necessário conhecer todas as especificações dos elementos utilizados para que a finalidade do mesmo seja alcançada com sucesso. Apesar de a norma NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1997) abordar o tema da MLC, o seu texto não faz

menção aos adesivos que devem ser utilizados, deixando a escolha a cargo dos projetistas. Da mesma maneira, a ASTM D905 (*American Society for Testing and Materials* - ASTM, 1998) não apresenta informações sobre os adesivos, deixando as especificações desses materiais a cargo dos fabricantes.

A MLC é um material ainda pouco utilizado no Brasil, por conta, entre outros fatores, da necessidade de testes de laboratório para verificar o desempenho do produto, bem como a exigência de um rígido controle de qualidade no processo produtivo. Sendo assim, devem ser realizados estudos a fim de caracterizar as interações nas juntas da madeira com os adesivos, visando determinar as melhores madeiras para utilização desta técnica para, assim, auxiliar os engenheiros na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada (SEGUNDINHO *et al.*, 2015).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em juntas de ligações de madeira coladas com diferentes concentrações de adesivo vegetal à base de óleo de mamona em peças de *Eucalyptus urograndis* e *Pinus* sp.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar o desempenho das espécies *Eucalyptus urograndis* e *Pinus* sp. quando utilizadas com juntas coladas.
- Avaliar a utilização do adesivo vegetal na colagem de juntas de madeira.
- Avaliar como a gramatura do adesivo influencia na colagem e no desempenho da resistência final das ligações.
- Comparar a resistência na linha da cola das peças coladas com a resistência ao cisalhamento paralelo as fibras da madeira maciça.

1.3 Delimitação da pesquisa

É importante ressaltar que a proposta do trabalho se concentra principalmente no desempenho do adesivo, devido ao fato de estes estarem isentos de uma norma própria.

Portanto, avaliou-se a influência das diferentes concentrações de adesivo no desempenho dos corpos de prova de ligações coladas. Além disso, ressalta-se que o estudo está limitado à resistência ao cisalhamento na linha da cola, e não a sua delaminação, que depende de diversos outros fatores além da força de ruptura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos utilizados nesta pesquisa, contextualizando a utilização da madeira como material de construção civil, apresentando as espécies de madeiras utilizadas neste trabalho, bem como a madeira laminada colada. Além disso, serão indicados também os resultados de alguns trabalhos similares já realizados nessa área.

2.1 A madeira na construção civil

Nos últimos anos, a indústria da construção civil vem aumentando a preocupação com algumas questões voltadas para a diminuição de custos e dos impactos ao meio ambiente, de forma a tornar a madeira um elemento capaz de sanar ambos os problemas supracitados sem comprometer o desempenho das obras (LOURENÇO *et al.*, 2013).

A madeira empregada na construção civil apresenta dois tipos de uso, afirma Zenid (2009), sendo esses os temporários e permanentes. No primeiro caso, a madeira é utilizada como ferramenta, ou seja, utilizada como formas, escoras, entre outros. Já no segundo caso, é tida como material estrutural, como vigas, pilares, treliças, e assim por diante.

No ano de 2019, foram quantificados 9 milhões de hectares de florestas plantadas no Brasil, sendo 77% desses correspondentes a árvores de *Eucalyptus* sp. e 18% correspondentes a árvores de *Pinus* sp. Portanto, essas porcentagens, somadas, compõem 95% de toda floresta plantada brasileira, de acordo com dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2020). A IBÁ ainda aponta a participação significativa do setor de florestas plantadas no PIB nacional, totalizando 97,4 bilhões de reais de receita bruta. Ressalta-se, ainda, que toda essa área corresponde a florestas plantadas certificadas, que, de acordo com Bissoli-Dalvi *et al.* (2017), visam a preservação das florestas nativas.

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2019), o eucalipto possui uma melhor adaptação ao plantio de reflorestamento. Dentre os fatores citados para tal comportamento, destacam-se a sua alta produtividade, a facilidade de adaptação às diversas regiões do país e uma boa relação custo-benefício.

É importante destacar que, de toda produção de madeira serrada no país, a maior parte destina-se ao próprio mercado brasileiro. Como exemplo, no ano de 2019, a produção de peças serradas alcançou o total de 9,9 milhões de metros cúbicos, sendo que mais de 90% desses recursos foram consumidos pelo mercado interno (IBÁ, 2020).

Além da grande oferta do material, outro quesito que o faz ressurgir na construção contemporânea são as suas diversas vantagens em relação a outros materiais. Conforme Lourenço *et al.* (2013), a madeira demanda poucos custos para a transformação em produto final, além de oferecer isolamento térmico e ser completamente renovável. Segundo Souto, Bueno e Silva (2016), outras vantagens que a madeira apresenta, além dos supracitados, são a sua grande versatilidade, aliada ainda à uma excelente relação entre resistência e peso. Os autores também citam o conforto acústico e a produção limpa, pois o material retém uma parcela do carbono da atmosfera.

Ademais, é possível observar, de acordo com a IBÁ (2020), que o campo de florestas plantadas contribui com o desenvolvimento regional, pois gera novos empregos e renda para a população, gerando benefícios não só ambientais, mas também de maneira econômica e social.

Entretanto, como todo material, a madeira também possui desvantagens. Dentre elas, Souto, Bueno e Silva (2016) citam a inflamabilidade e os danos causados por fatores externos, como microrganismos. Contudo, os autores declaram que são questões que podem ser contornadas. Por exemplo, destaca-se que, por não ter uma boa condução de calor, em uma situação de incêndio uma peça robusta de madeira consegue manter suas propriedades mecânicas por um tempo considerável. Já o problema dos microrganismos pode ser solucionado com tratamentos químicos.

Júnior, Silva e Soares (2017) afirmam que tem se apresentado mais eficaz a utilização da madeira como elemento estrutural em obras, representando uma expansão significativa a longo prazo. Entretanto, Souto, Bueno e Silva (2016) informam que a aplicação do material no Brasil ainda é escassa, fato influenciado principalmente pelo preconceito injusto de que obras de madeira são, de certo modo, inferiores, além da falta de profissionais qualificados no ramo. De acordo com esses autores, o sul do país é a região na qual mais se trabalha para a mudança desse cenário, reconhecendo o real potencial do material.

2.2 *Eucalyptus urograndis*

A grande diversificação das propriedades do eucalipto e a oportunidade de modificação genética de duas ou mais espécies, gerando assim linhagens híbridas, possibilitam o desenvolvimento de características para diferentes usos, dentre eles a produção de peças de madeira serrada com propriedades de alta qualidade (PEREIRA *et al.*, 2000). De acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997), observa-se que, dentre as espécies de eucalipto contempladas pela norma, a que possui pior desempenho com relação as características mecânicas se enquadra na classe de resistência C25, sendo essa uma classe média. Entretanto, a maioria das espécies possuem resistência média contida na classe mais alta da norma, a C30.

Dentre as diversas utilizações da madeira de eucalipto, pode-se citar desde usos mais comuns, como a produção de lenha, carvão e celulose, até usos mais refinados, como, por exemplo, a utilização do material de maneira estrutural em construções ou na indústria moveleira (PEREIRA *et al.*, 2000).

Evidencia-se que, com o passar do tempo, o gênero *Eucalyptus* vem se adaptando para suportar situações desfavoráveis ao seu desenvolvimento. Dentre as espécies, sobretudo ao sul do país, destacam-se o híbrido *Eucalyptus urograndis* e seu progenitor, o *Eucalyptus grandis*, principalmente nos quesitos relacionados à sobrevivência e desenvolvimento (RIBASKI, 2018).

Além da região sul, o sudeste do Brasil apresenta resultados promissores na cultura do *Eucalyptus* sp., demonstrando um possível aumento do setor local (ALFONSI *et al.* 2011). Em consonância com esse crescimento, destaca-se a produtividade do material no país, que gira em torno de 35,3 m³ por hectare ao ano.

Em relação ao híbrido *Eucalyptus urograndis* (Figura 1) nota-se, entre outros fatores, o elevado desempenho da espécie na geração de energia (TONINI, 2020). Outro quesito em que se percebe uma melhoria nos clones de *Eucalyptus grandis*, quando comparado ao *Eucalyptus urophylla*, reside nas particularidades mais vantajosas para fabricação de celulose (CARVALHO e NAHUZ, 2001). Segundo Pereira *et al.* (2002), essas melhorias do *Eucalyptus urograndis* só foram possíveis graças aos procedimentos de melhoramento genético.

Figura 1 - *Eucalyptus urograndis*



Fonte: Agrolink (2021)

2.3 *Pinus* sp.

No ano de 1948, introduziu-se no Brasil espécies denominadas “pinheiros amarelos”, referindo-se a várias espécies do gênero *Pinus*. Dentre essas, as que se mostraram mais produtivas foram o *Pinus taeda* (Figura 2) e o *Pinus elliotti* (SHIMIZU, 2008). De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (2020), 87% das florestas de pinus estão situadas na região sul, em especial no estado do Paraná.

Figura 2 - *Pinus taeda*



FONTE: Materioteca Sustentável (2020)

Atualmente, o *Pinus* é um dos gêneros utilizados no país em florestas plantadas, e, conforme Abrão *et al.* (2015), o plantio dessas árvores melhorou a condutividade hidráulica do solo, além de trazer outros benefícios, como a preservação do restante da mata nativa.

No ano de 2019, a produção da madeira de pinus foi de 31,3 m³ por hectare, demonstrando um leve aumento com relação ao ano de 2018 (IBÁ, 2020). A IBÁ também cita algumas razões para esse aumento, dentre elas o melhoramento genético e a mecanização dos plantios.

De acordo com Shimizu (2008), a grande disponibilidade da madeira de *Pinus* impulsionou os seus diversos usos, como a fabricação de compensados, móveis, celulose, e peças de madeira serrada largamente utilizadas pelo mercado da construção civil.

Segundo Júnior (2008), algumas espécies do gênero apresentam resistência correspondente à classe C30 da NBR 7190 (ABNT, 1997), demonstrando que as madeiras de *Pinus* estão entre as coníferas mais resistentes entre as existentes no Brasil, enfatizando a sua capacidade de ser utilizada como componente estrutural.

2.4 Madeira laminada colada (MLC)

A madeira laminada colada é composta por lâminas de madeira unidas por um adesivo, tendo a disposição das peças com as fibras paralelas entre si (ROSA, 2020). Os elementos de madeira laminada colada são construídos através de dois processos, obtendo-se as tábuas que constituirão a peça final, e, então, realizando a colagem (SEGUNDINHO *et al.*, 2018).

Uma das maiores vantagens da utilização da MLC consiste na possibilidade de contornar a limitação dimensional da madeira. Segundo Segundinho *et al.* (2017), o crescente desmatamento, aliado a leis que visam proteger as florestas nativas, dificultaram ainda mais a obtenção da madeira maciça em grandes dimensões. Desta forma, com a finalidade de contornar a problemática, a madeira laminada colada surge como possível solução.

Albino, Mori e Mendes (2010) afirmam que a união das peças de MLC, através de um adesivo, depende, na sua maioria, de três fatores principais: primeiramente, da própria madeira e suas características, que variam entre os diversos gêneros e espécies; do adesivo, que, assim como a madeira, possui características que variam entre as variedades existentes; e do processo utilizado para a colagem, que deve ser realizado seguindo uma dentre as diversas diretrizes.

A colagem das peças de madeira ocorre através de adesão, definida como a união de duas superfícies pela ação de outro elemento, neste caso representado pelo adesivo. Além de gerar a adesão, outra característica importante exigida dos adesivos é a de ocupar os pequenos espaços entre as faces coladas, aumentando as interações entre a linha de cola e a madeira, pois, em situações normais, tais espaços estariam inocupados (BIANCHE *et al.* 2017). De acordo com Segundinho *et al.* (2017), quanto maior a ocupação destes vazios, ou seja, quanto melhor a penetração do adesivo a madeira, maior a resistência à delaminação e ao cisalhamento na linha da cola.

Quando o elemento estrutural de MLC é utilizado como uma viga biapoiada, as lamelas superiores são submetidas à compressão, enquanto as inferiores atuam tracionadas (FARIA *et al.*, 2019), devendo as lâminas possuírem uma ótima adesão, com a finalidade de se manterem unidas durante os carregamentos. O mesmo acontece quando a peça é submetida a compressão, ou seja, atuando como um

pilar, onde uma ligação adequada é necessária para evitar a flambagem das peças menores, que levariam à ruptura da estrutura.

Dentre as diversas classes de adesivos, segundo Vilar (2002), pode-se citar a dos poliuretanos (PU), que conseguem realizar a adesão de boa parte dos materiais, além de possuírem diversas outras vantagens, como, por exemplo, a sua aplicabilidade em diversas temperaturas e juntas de grande resistência. Os adesivos de PU podem ser bicomponentes, ou seja, o adesivo estará pronto para uso após a mistura de dois elementos distintos, e possuem cura mais acelerada, além de demandarem um custo menor.

Dentro das classes dos PU's, cita-se a existência de produtos derivados de elementos a base de petróleo e que possuem compostos orgânicos voláteis na sua estrutura, elementos tóxicos e prejudiciais à saúde. Entretanto, para contornar esta problemática, existem os poliuretanos derivados de óleos vegetais, como o óleo de mamona, que, além de não serem nocivos à saúde, são também biodegradáveis, entrando em concordância com as características ambientais positivas da madeira (MARINHO, 2013).

2.5 Estado da arte

Neste tópico serão apresentados alguns trabalhos realizados abordando a madeira laminada colada, visando contextualizar as pesquisas envolvendo o assunto.

2.5.1 Segundinho *et al.* (2015)

Visando avaliar a resistência ao cisalhamento na linha de cola de peças utilizando três espécies de madeiras distintas: *Tectona grandis*, *Eucalyptus sp.* e *Pinus oocarpa*, os autores confeccionaram três vigas de madeira laminada colada com 200 cm de comprimento e seção transversal de 9x9 cm compostas por três tábuas com espessura de 3 cm, utilizando adesivo bicomponente a base de melanina-ureia-formaldeído (MUF) com gramatura variando entre 200 e 250 g/m², com aplicação de uma pressão de 1 MPa.

Corpos de provas foram extraídos das vigas e submetidos ao ensaio de cisalhamento na linha de colagem, seguindo a NBR 7190 (ABNT, 1997), para as condições secas ao ar livre e saturadas com imersão em água por 48 horas.

Com os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento, fica evidenciado o grande potencial de utilização da espécie *Pinus oocarpa* em conjunto com o adesivo MUF para estruturas de madeira laminada colada em ambientes com baixa umidade, apresentando uma resistência média de 7,57 MPa nas peças coladas e 8,01 MPa na madeira maciça. Entretanto, as outras duas espécies apresentaram perda de resistência maior quando utilizadas como MLC, sendo que o *Eucalyptus sp.* teve uma redução de 11,49 MPa na madeira maciça para 8,47 MPa na peça colada e a *Tectona grandis* passou de 10,01 MPa para 8,61 MPa, na mesma condição. Então, se faz necessária a realização de um número maior de estudos, buscando a identificação dos adesivos que melhor se adequem a essas duas espécies. Apesar da ocorrência de alguns resultados positivos para as peças secas, nenhum dos resultados foi considerado satisfatório com as peças no estado saturado.

2.5.2 Segundinho *et al.* (2017)

Neste trabalho, os autores analisam a resistência ao cisalhamento na linha de cola, a delaminação e o estudo da interface madeira-adesivo em peças de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* com arseniato de cobre cromatado (CCA) coladas com diversos adesivos, como compostos de ureia-formaldeído (UF), melamina-ureia-formaldeído (MUF), poliuretano à base de mamona (PUR), poliacetato de polivinila (PVA), tanino-formaldeído (TF) e resorcinol-formaldeído (RF). Também foram determinadas as características físicas e mecânicas da madeira com e sem tratamento.

A colagem foi feita a partir de uma linha dupla de cola com gramatura de 150 g/m², submetendo-se as peças à uma compressão de 1,2 MPa. Então, procedeu-se os ensaios seguindo as recomendações normatizadas pela NBR 7190 (ABNT, 1997), ASTM D 1037-06 (ASTM, 2012), ASTM D 905-08 (ASTM, 2013) e AITC T110 (ASTM, 2007), sendo os 3 procedimentos sobre a MLC realizados 6 vezes, com uma repetição para cada adesivo.

A análise dos resultados dá destaque aos corpos de prova que utilizaram os adesivos MUF (11,444 MPa), PVA (12,8594 MPa), UF (12,4017 MPa) e RF (11,6461 MPa). Como a penetração desses adesivos na madeira foi superior, também se obteve melhores resultados nos outros ensaios. Em contrapartida, os autores não recomendam o uso dos outros 3 adesivos para a madeira de *Eucalyptus cloezina* tratada com CCA, pois nenhum resultado foi satisfatório para utilização em estruturas, sendo esses o PUR (8,2928 MPa) e TF (1,6233 MPa).

2.5.4 Segundinho *et al.* (2018)

Neste trabalho, os autores determinaram a resistência à compressão paralela e normal as fibras, cisalhamento na linha de cola e delaminação das vigas de MLC fabricadas a partir de 80 tábuas de dimensões 530x90x22,5mm, aplicadas na construção de 20 peças de MLC, sendo realizada a colagem com o adesivo de poliuretano (PUR) em 10 delas e o de resorcinol-fenol-formaldeído (REF) nas 10 restantes, com gramatura de 300 g/m² em ambos os casos.

A resistência ao cisalhamento na condição seca foi levemente superior para as peças com o adesivo PUR, que obteve um valor médio de 12,68 MPa, em comparação à resistência de 10,40 MPa do adesivo REF. Entretanto, na condição saturada, houve um decréscimo superior a 50% na resistência das peças com PUR, passando a um valor de 5,99 MPa. Em contrapartida, as peças coladas com o REF apresentaram um decréscimo na resistência da condição seca para a saturada de menos de 15%, totalizando 8,96 MPa, obtendo-se, portanto, um valor de resistência quando saturada maior que as peças coladas pelo outro adesivo.

2.5.5 Biazzon *et al.* (2019)

Este trabalho analisou a resistência ao cisalhamento nas juntas coladas em madeiras de *Pinus elliottii* dois adesivos à base de poliacetato de vinila (PVAc), Madeiranit® e Henkel®, com uma gramatura de 200 g/m².

Foram coladas duas pranchas, sendo uma de 650x55x30mm e outra de 650x55x20mm, sob a aplicação de uma tensão de 0,59 MPa durante quatro horas, sendo extraídos 15 corpos de prova por tratamento, com as medidas de acordo com

a NBR 7190 (ABNT, 1997). Os adesivos foram utilizados em suas formas diluídas em água, na proporção 1:2, e não diluídas, totalizando 4 tratamentos.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento demonstraram que as peças que utilizaram o adesivo Madeiranit® diluído apresentaram o melhor desempenho, com uma resistência na linha da cola de 6,52 MPa, sendo que o adesivo não diluído obteve um resultado de 6,49 MPa. Em contrapartida, o adesivo Henkel® não diluído apresentou o pior desempenho, com resultado de 5,15 MPa, enquanto o mesmo adesivo diluído obteve 5,86 MPa. Para ambos os adesivos, os melhores resultados ocorreram quando estes estavam diluídos, tendo em vista a diminuição da viscosidade devido a diluição e a maior penetrabilidade do adesivo, gerando maior aderência à madeira.

2.5.6 Faria *et al.* (2019)

Neste trabalho foram fabricadas 3 vigas de MLC, composta por 5, 7 e 9 lâminas, a partir de peças com dimensões de 15x6x200 mm coladas com um adesivo vegetal à base óleo de mamona, em uma gramatura de 350 g/m². Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997) e ASTM D198-15 (ASTM, 2015), com intuito de obter os parâmetros físicos e mecânicos das peças de MLC, determinando o módulo de ruptura e elasticidade, além da análise da linha de cola, delaminação das peças, resistência à compressão paralela às fibras e ao cisalhamento paralelo às fibras.

Avaliando a resistência ao cisalhamento na linha da cola, as peças de MLC, considerando todos os tratamentos, com a quantidade variada de lâminas, obtiveram uma média de 6,95 MPa, apresentando valores estatisticamente iguais aos da madeira maciça, que foi de 6,56 MPa, que comprova a eficiência do adesivo e da utilização de peças de MLC ao invés de peças maciças.

2.5.7 Rosa *et al.* (2020)

Para determinar a densidade básica, resistência à compressão paralela às fibras e ao cisalhamento paralelo às fibras, além dos módulos de ruptura e elasticidade em peças de *Cryptomeria japonica* classificadas visualmente, os autores produziram 80 tábuas de dimensões 60x15x2200 mm e classificaram estas

visualmente de acordo com a norma ASTM D 245 (ASTM, 2006) e de acordo com o seu módulo de elasticidade, obtido em conformidade com a norma ASTM D 4761 (ASTM, 2013).

Em seguida, foram fabricadas 20 vigas de MLC, utilizando um adesivo à base de poliuretano em uma gramatura de 200 g/m², divididas em 4 categorias: T, T1, T2 e T3. Os elementos da categoria T correspondem somente às peças com a melhor classificação, ou seja, sem defeitos. Já na categoria T1, além de peças sem defeitos, foram empregadas também peças com poucos defeitos. As vigas caracterizadas como T2 correspondem ao restante das peças, sendo, então, as que apresentam maior quantidade de defeitos. Por fim, o tratamento T3 fez o uso de todas as tábuas, sem distinção de classificação.

Os autores observaram que a madeira maciça não apresentou os requisitos mínimos para ser utilizada como elemento estrutural de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997), por conta da baixa resistência à compressão paralela às fibras (16,55 MPa) e a densidade básica (266 kg/m³). Entretanto, as vigas de madeira colada da categoria T2, que obtiveram os piores resultados dentre as peças de MLC, se enquadram na classe estrutural C-20 pela mesma norma, a partir da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras obtido de 1,56 MPa, atestando o seu potencial de utilização em elementos estruturais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será abordada a metodologia utilizada para a realização dos ensaios da ligação colada das peças de madeira, bem como a sua caracterização física e mecânica. Para isso, será descrito todo o processo de obtenção dos materiais, procedimentos preparatórios, montagem das peças, ensaios realizados e métodos de análise dos resultados. Ainda serão apresentadas todas as fórmulas e normas utilizadas como base para determinação desses resultados.

Ressalta-se que toda a obtenção, caracterização física e mecânica da madeira de *Eucalyptus urograndis* foi realizada por Cavalheiro (2021) para a sua tese de doutorado. O autor deste trabalho realizou, então, a colagem e ensaio da resistência ao cisalhamento na linha da cola das peças coladas com essa madeira e também para o *Pinus* sp., bem como toda a sua obtenção e caracterização.

3.1 Madeiras

Para a realização deste trabalho, optou-se pela utilização de madeiras das espécies *Pinus* sp. e *Eucalyptus urograndis*. Tal escolha deu-se, sobretudo, por conta da sua maior disponibilidade no mercado regional. A madeira de *Pinus* sp. está apresentada de forma genérica por conta da impossibilidade de realizar a caracterização para definir a sua espécie exata, por conta do rastreio falho da sua origem e falta de tempo hábil para realização de ensaios.

Obteve-se as madeiras na seção 80x80mm, sendo 28 peças de *Eucalyptus urograndis* e 27 peças de *Pinus* sp., com 1m de comprimento cada, conforme apresentado na Figura 3. Essas peças foram encaminhadas ao laboratório, onde permaneceram armazenadas a fim de estabilização da umidade.

Figura 3 – Exemplos das madeiras de *Pinus* sp. (esquerda) e *Eucalyptus urograndis* (direita)



FONTE: Autoria própria (2021)

As peças de *Eucalyptus urograndis* foram obtidas, cortadas e ensaiadas quanto às características físicas e mecânicas de acordo com o trabalho de Cavalheiro (2021), cujos resultados estão apresentados na seção de resultados e discussões deste trabalho.

A madeira de *Pinus* sp. foi seca em estufa durante 10 dias, em temperatura média de 25°C, para redução gradativa do teor de umidade, visto que este material foi entregue pelo fornecedor com elevada umidade. Após a secagem, as peças foram beneficiadas em seções de 60x60mm e 25x55mm, com comprimento de 1m, para produção dos corpos de prova de madeira colada e seção de 15x30mm, com comprimento de 50mm, para o ensaio de densidade.

Após o beneficiamento, as peças retornaram à estufa a fim de atingir a umidade em torno de 12%. Passados 5 dias de secagem, as peças foram aplainadas com seções de 50x50mm para os ensaios das características mecânicas e 51x19mm para o ensaio da ligação colada.

A madeira de *Eucalyptus urograndis*, conforme o trabalho de Cavalheiro (2021), foi serrada em dimensões de 20x30x50mm para o ensaio da densidade básica e para a determinação das características mecânicas da madeira, as peças utilizadas, em conformidade com a NBR 7190 (ABNT, 1997), foram obtidas nas mesmas dimensões já citadas para a madeira de *Pinus* sp., assim como os corpos de prova utilizados nos ensaios referentes à ligação colada.

3.2 Adesivo

Para a colagem das madeiras, utilizou-se o IMPERVEG® AGT 1315, adesivo de poliuretano vegetal à base de óleo de mamona, bicomponente, isento de solventes, que não libera componentes tóxicos, formado pela mistura de um pré-polímero e um polioli. Segundo o fabricante, a mistura dos componentes A e B deve ser feita a frio e na proporção de massa de 1:1,5, respectivamente. Após a mistura, o tempo de trabalho do polímero gira em torno de 15 minutos, e, por isso, recomenda-se a mistura em pequenas quantidades. O adesivo possui um tempo de secagem ao toque de 60 e 90 minutos e um período de cura de 24 horas, dependendo das condições do ambiente.

De acordo com o fornecedor, o rendimento do adesivo varia dependendo das características e resistências mecânicas desejadas. Portanto, cabe aos usuários a definição da quantidade de polímero a ser utilizada. Tendo isso em vista, buscando atestar qual a quantidade mais eficiente para a colagem das espécies de madeira utilizadas, optou-se pela utilização de 3 gramaturas diferentes: 150 g/m², 200 g/m² e 250 g/m². O adesivo utilizado está apresentado na Figura 4.

Figura 4 - IMPERVEG® AGT 1315



FONTE: Autoria própria (2021)

3.3 Caracterização das madeiras

A caracterização das madeiras se deu seguindo as recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997). Para isso, extraiu-se corpos de provas aleatoriamente ao longo de um lote com volume total inferior a 12 m³, além das peças utilizadas serem isentas de defeitos.

Ainda seguindo a norma, realizou-se os ensaios para determinação das seguintes propriedades: teor de umidade, densidade básica, resistência à compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

A determinação da densidade da madeira de *Pinus* sp., foi feita a partir do ensaio de 12 corpos de prova. Já para a madeira de *Eucalyptus urograndis*, realizou-se cada ensaio com 9 repetições de 6 corpos de prova cada lote, totalizando 54 exemplares.

Para a determinação dos aspectos mecânicos da madeira de *Eucalyptus urograndis*, feita por Cavalheiro (2021), utilizou-se 12 corpos de prova para compressão e 18 corpos de prova para cisalhamento, totalizando 30 exemplares. Já para o *Pinus* sp., utilizou-se 18 corpos de prova para cada propriedade, totalizando 36 exemplares.

3.3.1 Determinação do teor de umidade

Para a obtenção do teor de umidade, determinou-se a massa dos corpos de prova antes e após a secagem em estufa, permanecendo a uma temperatura de 103 ± 2 °C e utilizou-se a Equação 1 para determinação do teor de umidade da madeira.

$$\text{Teor de umidade \%} = \frac{W_i - W_s}{W_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

W_i = Massa inicial da madeira, em gramas

W_s = Massa da madeira seca, em gramas.

3.3.2 Determinação da densidade básica

O valor da densidade básica dos corpos de prova é obtido com a relação entre a massa seca e o volume saturado do corpo de prova. O volume saturado é

calculado a partir do valor médio medido em três pontos diferentes para cada dimensão da peça. Já a massa seca é obtida seguindo o mesmo procedimento descrito para o ensaio de umidade. A Equação 2 apresenta a fórmula para cálculo da densidade básica.

$$\text{Densidade básica} = \frac{W_s}{V_{\text{sat}}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

W_s = massa seca, em gramas

V_{sat} = volume saturado, em gramas.

3.3.3 Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras

Para a realização do ensaio de resistência à compressão paralela às fibras, submeteu-se os corpos de prova à ação de uma prensa (Figura 5), a fim de obter-se a máxima tensão de compressão suportada por uma peça de seção transversal quadrada, com 5cm de lado.

Figura 5 - Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras



FONTE: Autoria própria (2021)

A resistência à compressão paralela às fibras é calculada de acordo com a Equação 3.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,m\acute{a}x}}{A_c} \quad (3)$$

Onde:

$F_{c0,m\acute{a}x}$ = força de compressão máxima, em N

A_{c0} = área da seção transversal da peça, em mm².

3.3.4 Ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras é definida como a tensão de cisalhamento máxima atuante na seção crítica de um corpo de prova. A Figura 6 apresenta uma imagem desse ensaio.

Figura 6 - Ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras



FONTE: Autoria própria (2021)

Calcula-se a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras a partir da Equação 4.

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,m\acute{a}x}}{A_{v0}} \quad (4)$$

Onde:

$F_{v0,m\acute{a}x}$ = força cisalhante máxima, em N

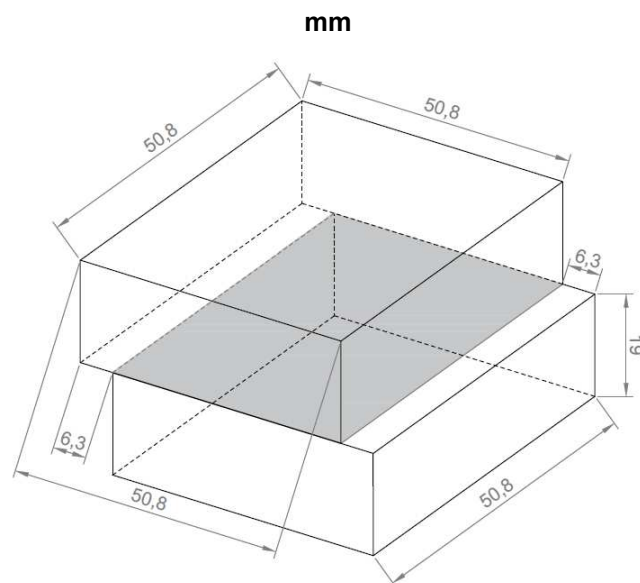
A_{v0} = área inicial da seção crítica no plano paralelo às fibras, em mm².

3.4 Ligações coladas

Para a determinação da resistência ao cisalhamento das ligações coladas realizou-se o ensaio de cisalhamento direto na linha da cola, conforme indicado pela ASTM D905 (ASTM, 1998). Para isso, confeccionou-se 108 corpos de prova, sendo divididos em lotes de acordo com a espécie da madeira e a gramatura de adesivo utilizada, sendo, assim, 6 lotes com 18 corpos de prova cada. Para colagem, utilizou-se as gramaturas de 150g/m², 200g/m² e 250g/m².

Cada corpo de prova é formado por duas peças de madeira, da mesma espécie, com seção de 19mmx50,8mm, tendo um comprimento de 44,4mm na direção paralela às fibras. A colagem das peças se deu de forma aproximada com o apresentado na Figura 7, resultando, assim, em uma seção crítica de cisalhamento de 50,8mmx38,1mm, correspondente a área colada.

Figura 7 - Corpo de prova para ensaio de cisalhamento na linha da cola, com dimensões em



FONTE: Adaptado de ASTM D905 (1998)

Previamente à colagem, realizou-se a mistura do adesivo na proporção 1:1,5, conforme como indicação do fabricante. Na sequência, utilizou-se uma balança para aplicação da gramatura correta de adesivo para cada corpo de prova. Dispôs-se as peças de madeiras sobre o equipamento, então tarou-se a balança e aplicou-se a cola igualmente nas duas peças, respeitando-se a gramatura para cada tratamento, com auxílio de uma seringa e de um pincel para distribuição uniforme do adesivo. Ressalta-se que, no momento da colagem, previu-se a realização de um ensaio de umidade para posterior determinação da umidade de colagem.

Após esse procedimento, passado o tempo de trabalho de adesivo de 15 minutos, submeteu-se os corpos de prova à ação de uma prensa, sob tensão de 1MPa na direção perpendicular ao plano de colagem, pelo período de 24 horas, correspondente ao período de cura do adesivo. Na sequência, os corpos de prova foram armazenados em sacos plásticos para evitar variações na umidade das peças, permanecendo assim até o momento da realização do ensaio.

Para determinação da resistência ao cisalhamento na linha da cola, utilizou-se uma máquina universal de ensaios, com capacidade de carga de 300kN, instalada no laboratório de materiais de construção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Toledo. Ensaiou-se os corpos de prova com a carga sendo aplicada na parte superior do equipamento, gerando uma tensão de cisalhamento no plano da cola. A Figura 7, apresenta anteriormente, também se aplica a este ensaio, que é realizado com os mesmos dispositivos.

A resistência ao cisalhamento na linha da cola das peças será determinada empregando a Equação 5.

$$f_{vc0} = \frac{F_{vc0,m\acute{a}x}}{A_{c0}} \quad (5)$$

Onde:

f_{vc0} : resistência ao cisalhamento na linha da cola, em MPa

$F_{vc0,m\acute{a}x}$: máxima força de cisalhamento na linha da cola, em N

A_{c0} : área crítica de cisalhamento da peça, em mm².

3.5 Análise dos resultados

Após a obtenção dos dados, realizou-se uma comparação geral dos resultados de cada grupo de experimentos através de uma análise de variância

(ANOVA). Para a obtenção de uma comparação par a par dos mesmos resultados, também se submeteu os dados ao teste Tukey.

Para realizar a análise dos dados, fez-se uso do *software* R através da interface RStudio. O *script* utilizado, elaborado utilizando-se o pacote ExpDes.pt, fez uma análise de variância entre os resultados, verificando a existência ou não de diferença significativa entre cada um dos grupos analisados. Para os casos em que a ANOVA gerou um valor-P menor que 5%, sendo 95% a significância determinada para o teste, indica-se que há pelo menos uma diferença significativa entre dois grupos dentre os analisados. Ou seja, caso isso aconteça, existe pelo menos um grupo com média diferente dos demais.

Sendo constatada pela ANOVA uma diferença significativa entre dois grupos, procede-se, então, o teste Tukey de comparação de médias. Nesse teste, o *software* realiza a comparação par a par de todos os grupos analisados e identifica, caso exista, quais grupos possuem média significativamente diferente dos demais.

A partir dos resultados dos testes, buscou-se identificar relações entre os dados obtidos, relacionando-se possíveis variações nas resistências das peças com a concentração de adesivo, comparando-se as duas espécies analisadas sob as mesmas condições e verificando-se a diferença entre peças maciças e coladas de uma mesma espécie. Além disso, também se comparou os resultados obtidos também com os valores mínimos de resistência para elementos estruturais de madeira, conforme preconizado pela norma NBR 7190 (ABNT,1997). Todas as análises realizadas serão abordadas com maior profundidade na sequência do trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os dados referentes à caracterização das madeiras ensaiadas, como em relação à umidade e sua variação ao longo do tempo, densidade básica dos corpos de prova e as resistências obtidas para as peças maciças em relação à compressão paralela às fibras e ao cisalhamento paralelo às fibras. Também serão apresentados os resultados dos ensaios das ligações de madeira coladas, referentes ao cisalhamento na linha da cola para diferentes concentrações do adesivo. Todos os dados estão detalhados no Apêndice A, sendo aqui apresentados apenas os resultados médios. Posteriormente, todos os dados serão comparados com o uso de métodos estatísticos.

4.1 Caracterização da madeira

Para madeira de *Pinus sp.* foi realizada a caracterização física e mecânica em laboratório enquanto os dados da espécie *Eucalyptus urograndis* foram obtidos no trabalho de Cavalheiro (2021), que realizou os ensaios de caracterização simultaneamente a este trabalho.

4.1.1 Caracterização física

A caracterização física das madeiras utilizadas neste trabalho consistiu na determinação da densidade básica das duas espécies e do teor de umidade dos corpos de prova após a colagem e ruptura das ligações.

A umidade apresentada pelas madeiras no momento da colagem das peças está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Teor de umidade da madeira no momento da colagem (%)

Espécie	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
<i>Eucalyptus urograndis</i>	12,89	12,40	13,35	0,22
<i>Pinus sp.</i>	9,56	8,73	10,00	0,36

FONTE: Autoria própria (2021)

Percebe-se uma diferença considerável entre a umidade dos corpos de prova de *Eucalyptus urograndis* e *Pinus* sp. Pode-se explicar essa variação por conta do tratamento diferente dado às madeiras. No trabalho de Cavalheiro (2021), as peças foram secas naturalmente ao longo de um período maior. Por conta disso, estabilizaram-se em torno da umidade de 12%. Já a madeira de *Pinus* sp. foi levada à estufa previamente à determinação do teor de umidade, o que levou à uma perda maior e uma redução nos valores observados no ensaio.

Determinou-se, também, a umidade de ambas as espécies após a ruptura dos corpos de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento na linha da cola, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Teor de umidade da madeira no momento da ruptura (%)

Espécie	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
<i>Eucalyptus urograndis</i>	12,26	11,89	12,61	0,20
<i>Pinus</i> sp.	9,95	8,57	11,71	0,52

FONTE: Autoria própria (2021)

Analisando-se os resultados obtidos acerca do teor de umidade das peças no momento da ruptura, percebe-se uma pequena variação em relação à umidade de colagem. Tal fato se deve à impossibilidade de criação de um ambiente completamente isolado para manutenção das peças até a ruptura, o que levou à influência da umidade ambiente nas propriedades das peças.

Determinou-se, também, a densidade básica de ambas as espécies, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Densidade básica da madeira, em g/cm³

Espécie	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
<i>Eucalyptus urograndis</i>	0,461	0,328	0,550	0,042
<i>Pinus</i> sp.	0,482	0,375	0,642	0,093

FONTE: Autoria própria (2021)

A partir dos resultados apresentados, identifica-se uma densidade próxima entre ambas as espécies de madeira. Este fato é importante para proporcionar condições similares à colagem das peças. Em uma peça com densidade elevada, pode-se dificultar a penetração do adesivo na madeira, resultado em uma linha de

cola de atuação mais superficial. Porém, de acordo com Cavalheiro (2021), caso a madeira apresente baixa densidade e seja aplicado um adesivo pouco viscoso, pode-se criar uma linha de cola faminta, na qual o adesivo penetra demasiadamente na madeira e não se estabiliza na linha da cola.

Portanto, a partir da caracterização das propriedades físicas da madeira, constata-se condições ideais para realização dos ensaios a serem feitos, com dados de umidade e densidade de acordo com resultados apontados em outros trabalhos da literatura já existente e em condições similares para os diferentes tratamentos.

4.1.2 Caracterização mecânica

Já para a caracterização mecânica das espécies, realizou-se os ensaios de resistência ao cisalhamento e à compressão na direção paralela às fibras. Executou-se os ensaios a partir de corpos de prova maciços de cada uma das espécies, conforme descrito na seção anterior.

De acordo com os ensaios realizados com a madeira de *Eucalyptus urograndis*, o teor de umidade médio dos corpos de prova no momento do ensaio de resistência à compressão era de 12,71% e no de cisalhamento 15,20%. Os resultados da resistência dos corpos de prova são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização mecânica da madeira de *Eucalyptus urograndis*

Ensaio	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Resistência à compressão paralela às fibras (MPa)	36,5	31,42	38,97	2,83
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	9,13	7,18	11,39	0,99

FONTE: Autoria própria (2021)

A NBR 7190 (ABNT, 1997) apresenta os valores médios de resistência ao cisalhamento e à compressão na direção paralela às fibras da madeira. Porém, a norma não aborda especificamente a espécie *Eucalyptus urograndis*. Entretanto, analisando-se os valores apresentados para as espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, identifica-se que a primeira apresenta uma resistência à compressão paralela às fibras de 40,3 MPa e cisalhamento paralelo às fibras de 7,0

MPa. Já a segunda possui resistência à compressão paralela às fibras de 46,0 MPa e cisalhamento paralelo às fibras de 8,3 MPa.

Comparando-se os valores do ensaio realizado com os apresentados pela norma, percebe-se uma proximidade em ambas as características, inclusive tendo os resultados do ensaio com valores superiores para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, o que demonstra que os exemplares utilizados neste trabalho são de qualidade adequada.

Da mesma forma realizada com o *Eucalyptus urograndis*, fez-se a caracterização mecânica da madeira de *Pinus* sp. De acordo com os ensaios realizados, o teor de umidade médio dos corpos de prova no momento do ensaio de resistência à compressão era de 12,85% e no de cisalhamento 12,86%. Os dados de resistência à compressão estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização mecânica da madeira de *Pinus* sp.

Ensaio	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Resistência à compressão paralela às fibras (MPa)	49,19	32,06	62,72	7,69
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	10,31	7,94	12,51	1,44

FONTE: Autoria própria (2021)

Novamente, a NBR 7190 (ABNT, 1997) apresenta os valores médios das resistências para as diversas espécies do gênero *Pinus*. Tomando como exemplo o *Pinus taeda*, a resistência à compressão paralela às fibras normatizada é de 44,4 MPa, enquanto a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras é de 7,7 MPa.

Percebe-se, portanto, que os valores da norma se apresentam próximos aos obtidos com a realização dos ensaios. Analisando-se todas as espécies de *Pinus* disponíveis na norma, constata-se que os corpos de prova ensaiados apresentam desempenho superior aos valores médios registrados para esse gênero, atestando a qualidade das amostras utilizadas neste trabalho.

4.2 LIGAÇÕES COLADAS

No ensaio de resistência ao cisalhamento na linha da cola, os resultados foram agrupados de acordo com a espécie dos corpos de prova e a concentração de adesivo utilizada para execução da ligação colada, sendo apresentados na Tabela 6, já sem considerar os *outliers* encontrados.

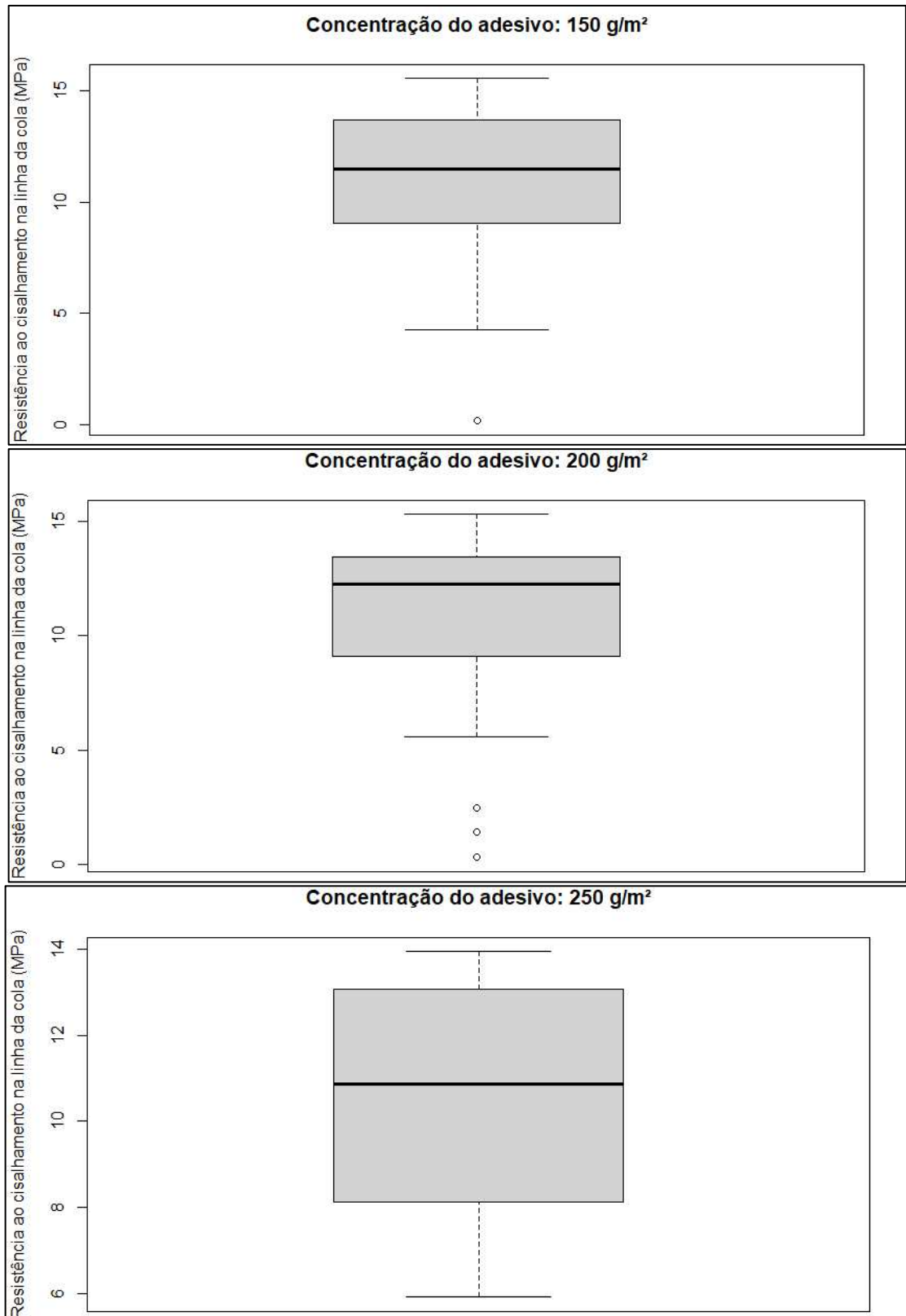
Tabela 6 - Resistência ao cisalhamento na linha da cola

Espécie	Concentração de adesivo	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
<i>Eucalyptus urograndis</i>	150g/m ²	11,92	9,94	13,38	0,90
	200g/m ²	11,24	8,64	15,36	1,99
	250g/m ²	11,36	9,14	14,17	1,16
	Maciça	9,13	7,18	11,39	0,99
<i>Pinus sp.</i>	150g/m ²	11,40	4,25	15,56	3,20
	200g/m ²	11,86	5,56	15,3	2,54
	250g/m ²	10,72	5,92	13,94	2,60
	Maciça	10,31	7,94	12,51	1,44

FONTE: Autoria própria (2021)

É importante ressaltar que, realizando-se a análise visual dos resultados obtidos nos ensaios, observou-se uma diferença grande entre as resistências observadas, sobretudo, para a madeira de *Pinus sp.* Portanto, realizou-se uma análise de *outliers*, a fim de identificar pontos discrepantes e possam estar distorcendo os resultados dos ensaios. Nos ensaios de cisalhamento da madeira colada de *Eucalyptus urograndis* e dos corpos de prova de madeira maciça de ambas as espécies não foram observados *outliers*. Porém, para a madeira de *Pinus sp.*, analisando-se separadamente cada um dos tratamentos, observaram-se alguns valores abaixo dos demais, fato que foi indicado com a análise dos *outliers* a partir dos gráficos *boxplot* indicados na Figura 8.

Figura 8 - Gráficos *boxplot* da resistência ao cisalhamento na linha da cola para os tratamentos com concentração de adesivo de 150 g/m², 200 g/m² e 250 g/m²



FONTE: Autoria própria (2021)

Percebe-se, portanto, a existência de pontos abaixo do limite inferior do gráfico. Tal fato pode ser explicado por conta de falhas na prensagem das peças. A chapa metálica responsável por distribuir a tensão uniformemente a todos os corpos de prova pode não ter se comportado de forma efetiva, gerando tensões que variavam de uma peça para a outra. Também, ao longo das 24h na prensa, a madeira se deforma, aliviando a tensão sobre a peça e, por se tratar de uma prensa manual, isso acaba levando à presença de alguns corpos de prova com desempenho bastante divergente. Sendo assim, realizou-se a exclusão desses dados do conjunto e procedeu-se todas as análises sem a consideração desses *outliers*.

A Figura 9 apresenta um exemplo de uma das peças rompidas após o ensaio.

Figura 9 - Corpo de prova rompido após o ensaio de cisalhamento na linha da cola



FONTE: Autoria própria (2021)

Comparando-se as diferentes concentrações do adesivo, percebe-se que não há uma relação direta com a resistência ao cisalhamento na linha da cola, tendo em vista que a resistência não necessariamente aumenta com o acréscimo de adesivo. Nota-se, ainda, que os valores obtidos para as ligações coladas são superiores aos resultados obtidos com os corpos de prova de madeira maciça.

Novamente, tem-se a repetição do comportamento observado para os exemplares de *Eucalyptus urograndis*, não podendo-se constatar relação direta entre a concentração de adesivo e a resistência ao cisalhamento na linha da cola.

Observa-se, neste caso, uma similaridade maior entre a resistência das peças maciças e as peças coladas. Apesar disso, apenas o tratamento com 200g/m² de adesivo teve desempenho inferior à madeira maciça.

4.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Além de analisar numericamente as resistências obtidas para as ligações coladas das duas espécies de madeira, é importante também realizar uma análise estatística desses resultados, a fim de atestar se a diferença observada, quando comparados tratamentos distintos, é realmente significativa.

Para isso, utilizou-se o *software* R e um script foi elaborado para realizar uma análise de variância (ANOVA), que verifica a existência de diferença significativa entre os tratamentos, e um teste Tukey, que, havendo diferença, faz a comparação par a par dos tratamentos a fim de identificar quais são os que apresentam essa diferença.

As comparações foram realizadas a fim de verificar se algum dos fatores, como a espécie da madeira e concentração do adesivo, interferem na resistência da ligação colada. Também se comparou o desempenho das ligações coladas em relação à madeira maciça.

Primeiramente, realizou-se uma ANOVA para verificar a existência de diferença significativa entre a resistência ao cisalhamento na linha da cola para cada uma das concentrações de adesivo utilizadas, para cada espécie. Observou-se para o *Eucalyptus urograndis* um valor-P de 0,33 e para o *Pinus* sp. um valor-P de 0,50. Portanto, a um nível de significância de 95%, não se obteve diferença significativa nos resultados de nenhuma das espécies.

Sendo assim, confirma-se a hipótese de que as médias são iguais, considerando a variação na gramatura do adesivo para cada uma das espécies. Esse resultado indica que a concentração do adesivo, quando aplicada na faixa entre 150g/m² e 250g/m², não tem influência direta na resistência ao cisalhamento na linha da cola em ligações de madeira coladas. Portanto, pode-se, considerando somente este fator, optar pela utilização de uma concentração menor do adesivo, prezando-se pelo benefício econômico sem prejuízo à questão técnica.

Na sequência, então, comparou-se a resistência ao cisalhamento na linha da cola entre as duas espécies estudadas, quando aplicada a mesma concentração de

adesivo na ligação. Portanto, realizou-se as três análises a fim de verificar se uma espécie possui desempenho superior à outra quando utilizadas em ligações coladas. A Tabela 7 apresenta os resultados dessas análises.

Tabela 7 - Comparação entre os resultados das espécies para a mesma concentração do adesivo

Concentração de adesivo	valor-P
150g/m ²	0,51
200g/m ²	0,44
250g/m ²	0,34

FONTE: Autoria própria (2021)

Analisando-se os resultados obtidos no teste de variância entre as espécies, percebe-se que o valor-P, para todas as combinações, a 95% de significância, indica a confirmação da hipótese de que as médias são iguais e não há diferença significativa na resistência das peças.

Portanto, esse resultado aponta que, dada uma mesma gramatura do adesivo a ser aplicada no processo de colagem, o desempenho das madeiras de *Eucalyptus urograndis* e *Pinus* sp. foi estatisticamente igual. Sendo assim, pode-se novamente optar pela opção mais viável economicamente, sem detrimento à resistência da ligação.

Buscou-se comparar, ainda, a diferença entre a resistência apresentada pelas ligações de madeira coladas e as peças maciças, para a mesma espécie. Para tanto, realizou-se a ANOVA para as três concentrações de adesivo e os resultados das peças de madeira maciça.

Para a madeira de *Pinus* sp., obteve-se um valor-P de 0,29, indicando que, a 95% de significância, não existe diferença significativa entre os resultados e as médias são estatisticamente iguais. Portanto, pode-se balancear somente as demais diferenças entre os dois métodos de utilização, ignorando-se a resistência ao cisalhamento da ligação colada, no momento de optar por utilizar juntas coladas ou peças maciças.

Já para o *Eucalyptus urograndis*, os resultados obtidos foram diferentes. A ANOVA resultou em um valor-P de $1,15 \times 10^{-7}$, um valor extremamente baixo, indicando que pelo menos 2 dos tratamentos analisados possuem diferença significativa entre si. Para identificar quais são os tratamentos com apresentam essa

diferença, então, realizou-se o teste Tukey de comparação de médias. A Tabela 8 apresenta os resultados do teste.

Tabela 8 – Comparação entre a resistência das peças coladas e maciças de *Eucalyptus urograndis*

Concentração de adesivo	Média (MPa)
150g/m ²	11,92 _a
200g/m ²	11,24 _a
250g/m ²	11,36 _a
Madeira maciça	9,13 _b

FONTE: Autoria própria (2021)

Os resultados do teste Tukey são exibidos de forma que médias estatisticamente iguais possuem a mesma letra, e as que diferem entre si possuem letras diferentes.

Analisando-se o quadro com os resultados obtidos, percebe-se que, conforme apresentado anteriormente, não existe diferença significativa entre a resistência apresentada pelas peças coladas de *Eucalyptus urograndis*. Porém, quando comparadas com a madeira maciça da mesma espécie, esta se apresenta como diferente das peças com ligação colada.

Observando-se, então, quais foram as médias obtidas para cada grupo, verifica-se que as peças coladas, independentemente da concentração de adesivo utilizada, apresentaram uma resistência significativamente superior à madeira maciça. Ou seja, além de todas as vantagens já abordadas neste trabalho que são obtidas com a utilização de peças coladas, estas ainda apresentam uma resistência ao cisalhamento na linha da cola superior à madeira maciça.

Portanto, a partir das análises realizadas, atesta-se que fatores como a gramatura do adesivo e a espécie da madeira, para os objetos de estudo deste trabalho, não influenciam significativamente nos resultados obtidos para a resistência ao cisalhamento na linha da cola ligações de madeira coladas. Ainda, foi possível observar uma superioridade na resistência das peças coladas em relação à madeira maciça, sobretudo para a espécie *Eucalyptus urograndis*.

5 CONCLUSÕES

Com as análises realizadas a partir dos resultados dos ensaios desenvolvidos ao longo deste trabalho, pode-se elucidar diversas questões referentes às ligações de madeira coladas e sua utilização na construção civil. Buscou-se, a partir do ensaio de cisalhamento em peças coladas de *Eucalyptus urograndis* e *Pinus* sp., verificar o desempenho dos corpos de prova ligados com adesivo à base de mamona.

Primeiramente, comparou-se a resistência apresentada por peças de uma mesma espécie, dentre as duas abordadas neste trabalho, com a aplicação de diferentes concentrações de adesivo na ligação, sendo essas de 150g/m², 200g/m² ou 250g/m². Para este fator, com a realização da ANOVA, não foram identificadas diferenças significativas na resistência ao cisalhamento na linha da cola apresentadas pelos diferentes tratamentos, fato que se repetiu em ambas as espécies analisadas.

Sendo assim, conclui-se que a concentração do adesivo, dentro das condições estabelecidas neste trabalho, não exerce influência significativa na resistência das ligações coladas. Portanto, é indicada a utilização da menor quantidade de adesivo, referente à concentração de 150g/m², para um incremento no custo-benefício da estrutura. Pode-se afirmar, também, que a utilização de menos adesivo não compromete a resistência das ligações, fazendo com que seja possível essa redução no custo da estrutura sem prejuízo direto ao desempenho técnico das peças.

Como não se obteve diferença significativa entre corpos de prova da mesma espécie, mas com variação na concentração do adesivo, buscou-se comparar as peças de espécies diferentes, quando submetidas às mesmas condições em relação ao adesivo componente da ligação, e novamente não se identificou diferença significativa na resistência ao cisalhamento na linha da cola.

Portanto, é possível concluir que, dadas as mesmas condições, a espécie da madeira, em se tratando de *Eucalyptus urograndis* e *Pinus* sp., não influencia diretamente na resistência da ligação colada. Então, novamente indica-se a preferência pela alternativa mais econômica, podendo-se optar pela espécie de madeira com melhor custo-benefício no momento da concepção do elemento estrutural.

Os dois fatos apresentados são de extrema relevância para este ensaio, pois indicam que não há necessidade de escolha pela opção mais custosa financeiramente, e que é possível prezar pelo custo-benefício da estrutura sem detrimento à parte técnica dos seus componentes, pois, mesmo optando-se pela espécie mais barata e utilizando a menor concentração de adesivo, dentre as abordadas neste estudo, as peças coladas apresentam desempenho satisfatório e similar às opções mais caras, quando analisada a resistência ao cisalhamento na linha da cola.

Analisando-se, então, as médias apresentadas para cada tratamento, constatou-se ainda que as ligações coladas apresentam resistência ao cisalhamento superior às peças maciças. Tal fato vem a acrescentar ainda mais às vantagens apresentadas com a utilização de peças com ligações coladas em relação à madeira maciça. Além da variedade dimensional, facilidade de obtenção e todos os outros aspectos já citados, conclui-se que, em relação à madeira de *Eucalyptus urograndis*, as peças coladas também possuem uma resistência ao cisalhamento superior quando comparadas a estruturas de madeira maciça da mesma espécie.

Portanto, com a finalização deste trabalho, conclui-se que as peças que utilizam ligações coladas se apresentam como uma excelente alternativa à utilização de peças maciças, tendo desempenho inclusive possivelmente superior a essas, o que vem a somar às demais vantagens possíveis com a sua utilização em elementos estruturais.

Além disso, também se conclui que, na execução de ligações de madeira coladas nas condições apresentadas neste trabalho, é possível optar-se pela utilização mais econômica, tanto em relação à espécie de madeira quanto à concentração de adesivo aplicada na ligação das peças. Constatou-se que, apesar de apresentar pequena diferença, as médias das resistências das peças em todos os tratamentos analisados foi estatisticamente igual.

Sendo assim, evidencia-se a importância das ligações coladas no âmbito da construção civil, tendo em vista o seu excelente desempenho mecânico em adição às vantagens dimensionais e de obtenção quando comparada à madeira maciça, recomendando-se a sua utilização mais ampla em elementos estruturais e outras estruturas e edificações e obras em geral.

5.1 Trabalho futuros

Ainda se sugere a realização de trabalhos futuros, para dar sequência nos estudos acerca das ligações de madeira coladas e incentivar ainda mais a sua utilização no mercado. Entre os temas a serem abordados, sugere-se uma aplicação prática das peças com ligações coladas de *Eucalyptus urograndis* e *Pinus* sp. em elementos estruturais, para possibilitar uma análise além da resistência na linha da cola especificamente, até mesmo para uma observação do comportamento da madeira ao longo do tempo e exposta a condições normais de utilização.

REFERÊNCIAS

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

ABRÃO, S. F.; SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; EBLING, A. A. Impacto do florestamento com *Pinus taeda* L. na porosidade e permeabilidade de um cambissolo húmico. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1073-1082, dez. 2015.

AGROLINK. **Eucalipto: *Eucalyptus urograndis***. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/problemas/eucalipto_3180.html. Acesso em: 21 jul. 2021.

ALBINO, V. C. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Estudo da interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex Maiden. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 509-516, set. 2010.

ALFONSI, W. M. V.; BOSCHI, R. S.; EVANGELISTA, B. A.; ALFONSI, R. R.; BONIDE, A. G.; SANS, L. M. A.; WREGE, M. S. Zoneamento agrícola de risco climático do *Eucalyptus grandis* para a região sudeste do Brasil. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2011, Guarapari. **Anais [...]**. Guarapari: INCAPER, 2011. 1 CD-ROM.

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC T110**: Cyclic delamination test. Centennial, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1037-06**: Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials. West Conshohocken, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 198-15**. Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 245**: Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber. West Conshohocken, 2006.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4761**: Mechanical properties of Lumber and Wood-Base Structural Material. West Conshohocken, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 905**: Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. West Conshohocken, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 905**: Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. West Conshohocken, 2013.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, R. V. O.; DELLA LUCIA, R. M. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus sp.* colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, 2017.

BIAZZON, J. C.; ARAÚJO, V. A. de; ALVES, P. R. G.; MORALES, E. A. M.; GONÇALVES, M. T. T.; VALARELLI, I. D. Resistência mecânica à adesão em superfícies de madeira de *pinus* aplainadas e unidas por adesivos PVAc. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, 2019.

BISSOLI-DALVI, M; FERRES, S. C.; ALVAREZ, C. E. de; FUICA, G. E. S. Avaliação da sustentabilidade da madeira por meio da ferramenta ISMAS. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, 2017.

CARVALHO, A. M.; NAHUZ, M. A. R. Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis x urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha. **Scientia Forestalis**, [S. L.], v. 59, p. 61-76, jun. 2001.

CARVALHO, J. P. R. G. de; NEVES, A. C. C.; LOPES, F. P. D.; MONTEIRO, M. S.; VIEIRA, C. M. F. Análise metodológica de confecção de compósito de poliuretano reforçado com juta. In: LXXIV CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2019, São Paulo. **Anais [...]**.

CAVALHEIRO, F. N. **Influência da quantidade de lâminas na resistência à compressão de peças de madeira laminada colada de eucalipto**. Dissertação (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2021.

EMBRAPA. **Transferência de tecnologia florestal: eucalipto**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto/perguntas-e-respostas>>. Acesso em: 21 mar. 2021.

FARIA, D. L.; CRUZ, T. M.; JÚNIOR, L. M.; DUARTE, P. J.; MENDES, L. M.; JÚNIOR, J. B. G. Number of laminae on the mechanical behavior of glued laminated timber (glulam) of *Toona ciliata* produced with vegetable polyurethane adhesive. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 43, 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório IBÁ 2020**. Brasília: 66p. Disponível em: < <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf> >. Acesso em: 17/03/2021.

IMPERVEG - **Ficha Técnica Resina AGT 1315**. Disponível em: < <http://imperveg.com.br/wp-content/uploads/2015/05/FICHA-T%C3%89CNICA-IMPERVEG-AGT1315.pdf> >. Acesso: 27/03/2021.

JAPANESE AGRICULTURAL STANDARD – JAS. **Glued laminated timber**. JAS 234. Tokyo, 2003.

JÚNIOR, C. R. C.; SILVA, W. C. R.; SOARES, P. T. M. L. Uso da madeira na construção civil. **Projectus**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 4, p. 79-93, 2017.

JÚNIOR, G. B. Estudo de algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus merkusii*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 237-243, set. 2008.

LOURENÇO, P. B.; BRANCO, J. M.; CRUZ, H.; NUNES, L. **Casas de Madeira**. Guimarães: Universidade do Minho, 2013.

MACIEL, S. M.; SARTORI, C. J.; JÚNIOR, J. B. G.; MENDES, L. M.; MORI, F. A. Avaliação da qualidade da linha de cola da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla*. In: XII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2010, Lavras. **Anais [...]** Lavras: EBRAMEM, 2010.

MARINHO, P. N.; NASCIMENTO, E. M.; NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W. L. E.; NETO, S. C.; AZEVEDO, E. C. Caracterização física e térmica de compósito de poliuretano derivado de óleo de mamona associado com partículas de bambu. **Polímeros**, São Carlos, v. 23, n. 2, p. 201-205, 2013.

MATERIOTECA SUSTENTÁVEL. *Pinus taeda*. Disponível em: <https://materioteca.paginas.ufsc.br/pinus-taeda/>. Acesso em: 21 jul. 2021.

MEIRELLES, C. R. M.; DINIS, H.; SEGALL, M. L.; SANT'ANNA, S. S. **Considerações sobre o uso da madeira no Brasil em construções habitacionais**. In: III FÓRUM DE PESQUISA FAU.MACKENZIE, 2007.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113p.

PEREIRA, R. C.; DAVIDE, L. C.; RAMALHO, M. A. P.; ANDRADE, H. B. Alternativas para aumentar a eficiência dos cruzamentos em programas de melhoramento de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 8, n. 2, p. 60-69, 2002.

PETRAUSKI, S. M. F. C.; SILVA, J. C.; PATRAUSKI, A.; DELLA LUCIA, R. M. Analysis of *Eucalyptus* glued-laminated timber porticos structural performance. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 5, p. 931-939, out. 2016.

RIBASKI, J. Desempenho de espécies de *Eucalyptus* para uso em sistemas de integração floresta-pecuária no bioma Pampa. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 38, p. 1-9, 2018.

ROSA, T. O.; VIEIRA, H. C.; TEREZO, R. F.; CUNHA, A. B. da; SAMPAIO, C. A. P.; ZANGALI, C.; ROSA, G. O.; WALTRICK, G. B. Classificação visual e mecânica da espécie *Cryptomeria japonica* D. Don para utilização em madeira laminada colada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 451, 4 jun. 2020.

SEGUNDINHO, P. G. A.; SILVA, A. C.; GONÇALVES, F. G.; REGAZZI, A. J. Caracterização da madeira laminada colada de *Eucalyptus sp.* produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 9, n. 2, p. 123-133, 2018.

SEGUNDINHO, P. G. A.; GONÇALVES, F. G.; GAVA, G. C.; TINTI, V. P.; ALVES, S. D.; REGAZZI, A. J. Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Revista Matéria**, [S. L.], v. 22, n. 02, 2017.

SEGUNDINHO, P. G. A.; NETO, C. C.; GONÇALVES, G. C.; REGAZZI, A. J.; JUNIOR, C. C. Resistência de linhas de cola para madeiras de reflorestamento. **Semina**, Londrina, v. 36, n. 1, p. 107-116, jan. 2015.

SHIMIZU, J. Y. **Pinus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 226 p.

SOUTO, L. G.; BUENO, L. S.; SILVA, P. D. Técnicas construtivas utilizando madeira e sua evolução histórica. **Ignis**, Caçador, v. 5, n. 2, p. 62-76, jul./dez. 2016.

TONINI, H.; MORALES, M. M.; WRUCK, F. J.; DELIBERALI, R. M. Growth and energy quality of *Eucalyptus* wood in different crop-livestock-forest spatial arrangements. **Floresta**, Curitiba, v. 50, n. 4, p. 1707-1716, out./dez. 2020.

VILAR, W. D. **Química e tecnologia dos poliuretanos**, 3 ed., Vilar Consultoria, 2002. Disponível em: < <http://www.poliuretanos.com.br> >. Acesso em: 25/03/2021.

ZENID, G. J. **MADEIRA uso sustentável na construção**, 2° ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: SVMA, 2009.

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS

Tabela A-1 - Teor de umidade no momento da colagem das pelias de *Eucalyptus urograndis*

CP	150 g/m ²			200 g/m ²			250 g/m ²		
	Wi (g)	Ws (g)	Teor de umidade	Wi (g)	Ws (g)	Teor de umidade	Wi (g)	Ws (g)	Teor de umidade
1	28,12	24,95	12,71%	23,59	20,91	12,82%	17,95	15,97	12,40%
2	20,75	18,39	12,83%	23,02	20,42	12,73%	33,77	29,95	12,75%
3	21,90	19,36	13,12%	26,06	23,05	13,06%	25,47	22,57	12,85%
4	26,69	23,68	12,71%	23,42	20,73	12,98%	21,74	19,26	12,88%
5	21,03	18,61	13,00%	26,74	23,59	13,35%	36,21	32,00	13,16%
6	14,39	12,76	12,77%	25,73	22,82	12,75%	25,11	22,20	13,11%

Tabela A-2 - Teor de umidade no momento da ruptura das pelias de *Eucalyptus urograndis*

CP	150 g/m ²			200 g/m ²			250 g/m ²		
	Wi (g)	Ws (g)	Teor de umidade	Wi (g)	Ws (g)	Teor de umidade	Wi (g)	Ws (g)	Teor de umidade
1	50,76	45,31	12,03%	44,14	39,30	12,32%	48,00	42,79	12,18%
2	49,91	44,51	12,13%	51,18	45,51	12,46%	48,02	42,79	12,22%
3	49,49	44,23	11,89%	47,62	42,31	12,55%	50,37	44,84	12,33%
4	47,18	42,14	11,96%	50,91	45,29	12,41%	46,34	41,25	12,34%
5	51,40	45,86	12,08%	49,77	44,26	12,45%	48,14	42,85	12,35%
6	45,87	40,96	11,99%	51,51	45,75	12,59%	47,77	42,55	12,27%
7	48,01	42,87	11,99%	47,86	42,62	12,29%	49,76	44,33	12,25%
8	43,92	39,01	12,59%	48,48	43,08	12,53%	45,96	40,94	12,26%
9	47,01	41,96	12,04%	48,67	43,24	12,56%	46,81	41,69	12,28%
10	43,34	38,70	11,99%	43,36	38,58	12,39%	45,57	40,60	12,24%
11	54,34	48,49	12,06%	48,58	43,21	12,43%	46,02	41,00	12,24%
12	47,46	42,33	12,12%	46,21	41,11	12,41%	44,27	39,40	12,36%
13	51,20	45,72	11,99%	51,25	45,52	12,59%	50,53	44,94	12,44%
14	47,23	42,10	12,19%	47,30	42,09	12,38%	45,76	40,78	12,21%
15	44,50	39,77	11,89%	47,55	42,34	12,31%	47,32	42,16	12,24%
16	47,16	42,07	12,10%	47,85	42,61	12,30%	46,90	41,74	12,36%
17	53,06	47,37	12,01%	50,13	44,60	12,40%	47,59	42,37	12,32%
18	49,24	43,99	11,93%	50,46	44,81	12,61%	52,07	46,37	12,29%

Tabela A-3 - Resistência à compressão paralela às fibras das peças maciças de *Eucalyptus urograndis*

CP	Área (cm²)	Força Máxima (N)	f_{co} (MPa)
1	2500,02	87175,68	34,87
2	2500,36	78561,16	31,42
3	2500,28	82384,11	32,95
4	2499,86	92894,65	37,16
5	2499,97	96923,7	38,77
6	2500,12	81704,02	32,68
7	2500,06	90277,32	36,11
8	2499,85	96769,13	38,71
9	2500,21	97408	38,96
10	2500,01	97325,57	38,93
11	2499,98	96099,34	38,44
12	2499,83	97418,3	38,97

Tabela A-4 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras das peças maciças de *Eucalyptus urograndis*

CP	Área (cm²)	Força Máxima (N)	f_{vo} (MPa)
1	2550,09	23628,11	9,27
2	2509,97	25225,3	10,05
3	2465,4	27729,2	11,39
4	2525	21690,8	8,59
5	2515	20794,3	8,27
6	2515,02	23669,3	9,41
7	2509,97	22154,5	8,83
8	2469,84	23978,4	9,71
9	2520,03	24411,2	9,69
10	2504,98	17991,5	7,18
11	2505	24895,5	9,94
12	2515,02	24596,7	9,78
13	2525,06	21443,5	8,49
14	2530,08	18455,2	7,29
15	2499,9	23329,2	9,33
16	2525,06	23051	9,13
17	2505	21907,2	8,75
18	2495	23102,5	9,26

Tabela A-5 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em ligações de madeira coladas de *Eucalyptus urograndis* com concentração de adesivo de 150 g/m²

CP	Área (mm²)	Força Máxima (N)	f_{v0} (MPa)
1	1876,25	23401,41	12,47
2	1815,42	22133,97	12,19
3	1819,25	18857,15	10,37
4	1798,32	22412,19	12,46
5	1762,50	23586,89	13,38
6	1844,15	20042,16	10,87
7	1805,00	20577,99	11,40
8	1810,68	18001,88	9,94
9	1881,60	21196,26	11,27
10	1761,54	20619,21	11,71
11	1843,86	23391,11	12,69
12	1815,66	23030,46	12,68
13	1836,45	22257,62	12,12
14	1782,24	22680,10	12,73
15	1790,40	21876,36	12,22
16	1884,15	21134,44	11,22
17	1834,57	22659,49	12,35
18	1832,19	22814,06	12,45

Tabela A-6 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em ligações de madeira coladas de *Eucalyptus urograndis* com concentração de adesivo de 200 g/m²

CP	Área (mm²)	Força Máxima (N)	f_{v0} (MPa)
1	1893,69	17950,36	9,48
2	1848,00	28378,47	15,36
3	1793,60	22164,88	12,36
4	1821,18	27038,89	14,85
5	1803,04	20361,60	11,29
6	1814,20	20145,21	11,10
7	1780,12	18444,97	10,36
8	1803,93	18991,11	10,53
9	1776,30	15528,81	8,74
10	1780,24	15384,55	8,64
11	1858,52	23937,25	12,88
12	1785,60	17156,92	9,61
13	1758,75	20619,21	11,72
14	1819,25	18578,93	10,21
15	1817,37	16919,91	9,31
16	1810,68	21484,79	11,87
17	1814,50	25142,87	13,86
18	1808,46	18517,10	10,24

Tabela A-7 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em ligações de madeira coladas de *Eucalyptus urograndis* com concentração de adesivo de 250 g/m²

CP	Área (mm ²)	Força Máxima (N)	f _{v0} (MPa)
1	1876,25	20031,86	10,58
2	1815,42	22206,10	12,02
3	1819,25	22721,32	12,67
4	1798,32	22680,10	12,45
5	1762,50	18640,76	10,34
6	1844,15	20979,87	11,56
7	1805,00	20660,43	11,61
8	1810,68	19578,46	10,85
9	1881,60	20310,08	11,43
10	1761,54	20773,78	11,67
11	1843,86	18754,11	10,09
12	1815,66	16322,25	9,14
13	1836,45	20691,34	11,76
14	1782,24	18372,84	10,10
15	1790,40	19269,33	10,60
16	1884,15	20402,82	11,27
17	1834,57	22175,19	12,22
18	1832,19	25627,18	14,17

Tabela A-8 - Densidade básica da madeira de *Pinus* sp.

CP	W _{sat} (g)	V _{sat} (g)	W _s (g)	V _s (g)	Dens. básica (g/cm ³)
1	14,72	26,79	10,05	24,88	0,38
2	23,88	25,92	15,12	22,53	0,58
3	22,34	26,28	10,96	23,33	0,42
4	19,92	26,64	10,86	24,28	0,41
5	26,77	26,53	11,60	24,01	0,44
6	15,54	26,63	10,82	25,33	0,41
7	22,16	27,12	11,86	24,13	0,44
8	16,56	27,27	11,87	24,85	0,44
9	21,75	27,38	12,41	23,57	0,45
10	23,60	24,73	14,91	21,57	0,60
11	23,20	25,45	14,79	22,21	0,58
12	26,08	25,22	16,20	21,84	0,64

Tabela A-9 - Teor de umidade no momento da colagem das pelias de *Pinus* sp.

CP	150 g/m ²			200 g/m ²			250 g/m ²		
	Wi (g)	Ws (g)	Teor de umidade	Wi (g)	Ws (g)	Teor de umidade	Wi (g)	Ws (g)	Teor de umidade
1	27,95	25,51	9,56%	33,33	30,39	9,67%	20,97	19,14	9,56%
2	22,89	20,85	9,78%	26,22	24,02	9,16%	19,87	18,17	9,36%
3	22,72	20,66	9,97%	20,47	18,67	9,64%	30,06	27,34	9,95%
4	25,47	23,29	9,36%	28,15	25,89	8,73%	25,74	23,46	9,72%
5	24,62	22,42	9,81%	19,50	17,81	9,49%	24,20	22,02	9,90%
6	21,44	19,59	9,44%	21,56	19,60	10,00%	29,06	26,68	8,92%

Tabela A-10 - Teor de umidade no momento da ruptura das pelias de *Pinus* sp.

CP	150 g/m ²			200 g/m ²			250 g/m ²		
	Wi (g)	Ws (g)	Teor de umidade	Wi (g)	Ws (g)	Teor de umidade	Wi (g)	Ws (g)	Teor de umidade
1	53,70	48,96	9,68%	46,11	41,95	9,92%	54,02	49,03	10,18%
2	56,24	51,26	9,72%	51,58	46,48	10,97%	46,95	42,55	10,34%
3	47,03	42,80	9,88%	51,48	46,78	10,05%	49,33	44,84	10,01%
4	54,09	49,44	9,41%	51,92	47,34	9,67%	49,69	45,09	10,20%
5	50,19	45,70	9,82%	52,72	48,06	9,70%	55,38	50,28	10,14%
6	45,28	41,25	9,77%	49,63	45,35	9,44%	52,46	48,32	8,57%
7	52,25	47,70	9,54%	53,91	49,05	9,91%	55,43	50,31	10,18%
8	61,18	55,72	9,80%	46,84	42,63	9,88%	49,37	44,78	10,25%
9	49,36	44,90	9,93%	68,19	62,10	9,81%	63,72	57,77	10,30%
10	47,47	43,26	9,73%	49,05	44,66	9,83%	52,18	47,30	10,32%
11	48,55	44,18	9,89%	60,35	54,96	9,81%	58,38	52,33	11,56%
12	53,98	49,23	9,65%	55,56	50,76	9,46%	54,93	49,89	10,10%
13	49,89	45,56	9,50%	46,74	42,51	9,95%	47,25	42,77	10,47%
14	46,24	42,32	9,26%	49,72	45,46	9,37%	62,79	56,21	11,71%
15	49,73	45,24	9,92%	45,13	41,10	9,81%	52,66	47,85	10,05%
16	54,23	49,50	9,56%	53,70	49,06	9,46%	45,41	41,20	10,22%
17	57,72	52,44	10,07%	53,80	49,09	9,59%	62,86	56,95	10,38%
18	53,37	48,59	9,84%	51,65	47,11	9,64%	55,31	49,76	11,15%

Tabela A-11 - Resistência à compressão paralela às fibras das peças maciças de *Pinus* sp.

CP	Área (mm²)	Força Máxima (N)	f_{c0} (MPa)
1	2641,96	149084,84	56,43
2	2606,10	119541,97	45,87
3	2490,00	100509,64	40,37
4	2490,00	100581,77	40,39
5	2505,00	127703,09	50,98
6	2550,16	124982,72	49,01
7	2490,01	100416,91	40,33
8	2595,90	114874,05	44,25
9	2595,90	129939,16	50,06
10	2595,90	132731,67	51,13
11	2480,03	120809,41	48,71
12	2585,72	131536,36	50,87
13	2495,00	140882,50	56,47
14	2595,90	83229,07	32,06
15	2515,00	140954,63	56,05
16	2606,10	132226,75	50,74
17	2505,00	147704,05	58,96
18	2505,00	157101,70	62,72

Tabela A-12 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras das peças maciças de *Pinus* sp.

CP	Área (mm²)	Força Máxima (N)	f_{v0} (MPa)
1	2565,00	30573,31	11,92
2	2672,73	21216,87	7,94
3	2560,20	32026,24	12,51
4	2585,60	29285,26	11,33
5	2575,26	26667,93	10,36
6	2575,26	31232,80	12,13
7	2605,68	24936,78	9,57
8	2565,12	29481,04	11,49
9	2616,26	21206,57	8,11
10	2682,43	29501,65	11,00
11	2590,65	30800,01	11,89
12	2616,26	24885,26	9,51
13	2621,40	24761,60	9,45
14	2570,24	22958,32	8,93
15	2605,80	25431,39	9,76
16	2590,65	23102,59	8,92
17	2595,48	29676,83	11,43
18	2575,44	23854,81	9,26

Tabela A-13 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em ligações de madeira coladas de *Pinus* sp. com concentração de adesivo de 150 g/m²

CP	Área (mm²)	Força Máxima (N)	f_{v0} (MPa)
1	1945,64	12746,61	6,55
2	1974,08	298,83	0,15
3	1955,52	26770,97	13,69
4	1944,32	23679,63	12,18
5	1946,10	8274,48	4,25
6	1962,82	26575,19	13,54
7	1939,20	13766,75	7,10
8	1992,94	21247,78	10,66
9	1906,18	24607,04	12,91
10	1948,10	28089,94	14,42
11	1939,36	17507,27	9,03
12	1950,00	21062,30	10,80
13	1913,82	28553,64	14,92
14	1915,65	27554,11	14,38
15	1937,72	21021,09	10,85
16	1972,86	30696,97	15,56
17	1973,94	20227,64	10,25
18	1942,20	24668,86	12,70

Tabela A-14 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em ligações de madeira coladas de *Pinus* sp. com concentração de adesivo de 200 g/m²

CP	Área (mm²)	Força Máxima (N)	f_{v0} (MPa)
1	1948,89	26915,23	13,81
2	1935,36	29604,70	15,30
3	2014,50	18290,41	9,08
4	1963,50	23741,46	12,09
5	1800,72	26018,75	14,45
6	1909,60	18970,50	9,93
7	1931,67	19063,24	9,87
8	1972,86	25256,22	12,80
9	1965,60	2802,81	1,43
10	1994,75	24802,82	12,43
11	1968,34	27141,93	13,79
12	1961,70	10902,11	5,56
13	1970,64	26472,14	13,43
14	1963,15	19475,42	9,92
15	1963,92	25585,96	13,03
16	1990,00	24771,91	12,45
17	1926,49	4781,27	2,48
18	1881,22	556,44	0,30

Tabela A-15 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em ligações de madeira coladas de *Pinus* sp. com concentração de adesivo de 250 g/m²

CP	Área (mm²)	Força Máxima (N)	f_{v0} (MPa)
1	1977,88	13519,44	6,84
2	1930,00	23236,54	12,04
3	1927,68	26729,75	13,87
4	1953,90	25544,74	13,07
5	1975,00	15858,55	8,03
6	1974,55	24473,08	12,39
7	1948,24	20825,30	10,69
8	1995,28	19125,07	9,59
9	1950,00	26626,71	13,65
10	1907,60	25081,04	13,15
11	1920,00	16899,30	8,80
12	1948,89	15683,38	8,05
13	1934,15	15724,60	8,13
14	1939,20	25348,96	13,07
15	1920,00	20619,21	10,74
16	1955,52	27255,28	13,94
17	1948,89	11530,68	5,92
18	1921,53	21113,83	10,99