



HELLEN MARA ALVES CHAVES RODRIGUES

**EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGAÇÃO NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO EM PEÇAS DE MADEIRA DE *Eucalyptus* PARA
USO ESTRUTURAL**

LAVRAS – MG

2020

HELLEN MARA ALVES CHAVES RODRIGUES

**EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGAÇÃO NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO EM PEÇAS DE MADEIRA DE *Eucalyptus* PARA USO
ESTRUTURAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein

Coorientador

Dr. José Benedito Guimarães Junior

**LAVRAS – MG
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Rodrigues, Hellen Mara Alves Chaves.

Efeito dos elementos de ligação na resistência ao cisalhamento
em peças de madeira de *Eucalyptus* para uso estrutural / Hellen
Mara Alves Chaves Rodrigues. - 2020.

49 p. : il.

Orientador(a): Paulo Ricardo Gherardi Hein.

Coorientador(a): José Benedito Guimarães Junior.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Push-out. 2. Pinos metálicos. 3. Efeito de cola. I. Hein, Paulo
Ricardo Gherardi. II. Guimarães Junior, José Benedito. III. Título.

HELLEN MARA ALVES CHAVES RODRIGUES

**EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGAÇÃO NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO EM PEÇAS DE MADEIRA DE *Eucalyptus* PARA USO
ESTRUTURAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 21 de agosto de 2020.

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein	UFLA
Dra. Fernanda Maria Guedes Ramalho	UFLA
Prof. Dr. José Benedito Guimarães Junior	UFLA
Prof. Dr. Raphael Nogueira Rezende	IFSULDEMINAS

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein
Orientador

**LAVRAS – MG
2020**

Aos amores da minha vida:

Meus pais Ricardo e Magda, por serem meus exemplos de vida.

Minhas irmãs Nayara e Carol por serem luz em minha vida.

Meu esposo João Vagner por ser meu porto seguro.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À *Jesus Cristo*, mestre da minha vida, por ter me concedido sabedoria e discernimento para realização deste trabalho.

Aos meus pais *Ricardo e Magda* pelo amor incondicional. Vocês são minha estrutura e meus maiores exemplos de honestidade e caráter. Devo tudo o que sou a vocês.

As minhas irmãs *Nayara e Carol* por serem minha referência de amizade, cuidado e amor. Vocês são parte de mim.

Ao meu esposo *João Vagner*, por estar ao meu lado em todos os momentos me incentivando e torcendo por mim. Seu amor e dedicação me motiva a ser melhor a cada dia.

Ao professor Dr. *Paulo Ricardo Gherardi Hein* pela orientação e dedicação na passagem de seu conhecimento, o que foi de muita relevância para a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. *José Benedito Guimarães Junior* pela coorientação e suporte durante a realização deste trabalho.

À *Universidade Federal de Lavras (UFLA)* e ao *Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira* pela infraestrutura e oportunidade de cursar o mestrado.

Aos professores do *Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira*, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos demais *funcionários e amigos* da *Ciência e Tecnologia da Madeira*, por todo auxílio e suporte.

À *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)* pela concessão da bolsa de mestrado.

“Porque dEle e por Ele, e para Ele, são todas as coisas; glória, pois, a Ele eternamente.

Amém”

Romanos 11:36

RESUMO

O comportamento mecânico da madeira unida por elementos de ligação quando submetida ao esforço cortante ainda não está bem estabelecido. Dessa forma, o presente estudo objetivou avaliar a resistência ao cisalhamento em peças de madeira ligadas por pregos ou parafusos com e sem adesivo. Para isso foram confeccionados 60 corpos de prova para o ensaio de *push-out*, a partir de três peças prismáticas de 25 x 25 x 100 mm (Radial x Tangencial x Longitudinal) com madeira de *Eucalyptus*. As peças foram conectadas por elementos de ligação com e sem aplicação de adesivo de acetato de polivinila 250g/m², totalizando seis tratamentos, de forma que os planos da seção crítica fossem paralelos à direção radial da madeira e apresentassem área de 37,5 mm². A partir disso, os resultados evidenciaram que a resistência ao cisalhamento variou significativamente entre os tratamentos. Os corpos de prova apenas parafusados e pregados resistiram a menores valores de força máxima em relação aos tratamentos que receberam cola, entretanto, apresentaram um comportamento mais dúctil. A aplicação de cola entre as partes aumenta a resistência do elemento, porém os pinos metálicos não exerceram nenhuma contribuição. Ainda, a aplicação de parafusos ou pregos imediatamente após a aplicação de adesivo não melhorou o desempenho mecânico das peças, provocando redução, respectivamente, de 24 e 39% da resistência ao cisalhamento em ensaio de *push-out*. Os pinos metálicos dos tratamentos que receberam cola não apresentaram deformação, a falha do elemento ocorreu na linha de cola. Enquanto que, os tratamentos que receberam apenas pregos ou parafusos, os pinos exibiram um modo de deformação classificado como tipo II segundo a teoria de Johansen, com a formação de uma rótula plástica.

Palavras-chave: *Push-out*. Pinos metálicos. Efeito de cola.

ABSTRACT

The mechanical behavior of wood joined by connecting elements when subjected to shear stress is not yet well established. Thus, the present study aimed to evaluate the shear strength in wooden pieces connected by nails or screws with and without adhesive. For this, 60 specimens were made for the push-out test, from three prismatic pieces of 25 x 25 x 100 mm (Radial x Tangential x Longitudinal) with Eucalyptus wood. The pieces were connected by connecting elements with and without application of 250g / m² polyvinyl acetate adhesive, totaling six treatments, so that the critical section planes parallel to the radial direction of the wood and had an area of 37.5 mm². From this, the results showed that the shear strength varied complementarily between treatments. The tests were only screwed and the nailed bodies resisted lower values of maximum strength in relation to the treatments that received glue, however, it causes a more ductile behavior. An application of glue between the parts increases the strength of the element, but the metal pins have made no contribution. Also, the application of screws or nails immediately after applying the label did not improve the mechanical performance of the parts, causing a reduction of 24% and 39%, respectively, in shear strength in a push-out test. The metallic pins of the treatments that received glue not forming, a failure of the element originating in the glue line. While, the treatments that received only nails or screws, the pins exhibited a type II formation mode according to Johansen's theory, with the formation of a plastic kneecap.

Keywords: Push-out. Metallic pins. Glue effect.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABELAS	5
1. INTRODUÇÃO	6
2 OBJETIVOS	8
3. REFERENCIAL TEÓRICO	9
3.1 Estruturas de madeira.....	9
3.2 Ligações entre elementos.....	9
3.2.1 Ligação de contato	11
3.2.2 Ligação colada	11
3.2.3 Ligações por pinos metálicos.....	13
3.3 Comportamento mecânico de peças ligadas – Teoria de Johansen	17
3.4 Principais estudos envolvendo resistência em peças ligadas	18
4 MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 Obtenção das peças de madeira	24
4.2 Elementos de ligação	25
4.3 Preparação dos corpos de prova e tratamentos	25
4.4 Ensaio mecânico	28
4.5 Análise das deformações	29
4.6 Análise estatística	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 Resistência ao cisalhamento em estruturas de madeiras submetidas ao ensaio de <i>push-out</i>	36
5.2 Efeito da aplicação de cola na resistência entre as partes	38
5.3 Análise dos modos de deformação por raios - X	40
6 CONCLUSÕES	42
7 REFERÊNCIAS.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de pregos: (a) Prego comum com cabeça (b) Prego comum sem cabeça (c) Prego com duas cabeças (d) Prego ardox (e) Prego anelar	14
Figura 2: Tipos de parafusos auto-atarraxantes para madeira	16
Figura 3: Tipos de parafusos comuns	17
Figura 4: Equações e modos de falha (EUROCODE) para uma seção de corte.....	18
Figura 5: Equações e modos de falha (EUROCODE) para duas seções de corte.....	18
Figura 6: Diferentes modos de falha nas articulações do composto madeira-madeira.....	19
Figura 7: Modos de deformações nos pinos metálicos e falha da viga.....	19
Figura 8: Viga de alumínio- madeira composta (ATC).	20
Figura 9: Modo de falha na conexão parafusada	20
Figura 10: Distribuição das tensões equivalentes dentro dos elementos de madeira.	21
Figura 11: Influência do diâmetro do parafuso na curva de deslizamento de carga.....	22
Figura 12: Influência do diâmetro do parafuso na curva de deslizamento de carga.....	22
Figura 13: Deformação do elemento metálico.....	23
Figura 14: Fluxograma das etapas executadas no trabalho.....	24
Figura 15: Pinos metálicos utilizados nos corpos de provas.....	25
Figura 16: Configuração dos corpos de prova.	26
Figura 17: Execução dos corpos de prova colados. A) Aplicação do adesivo, B) Sistema de prensagem com grampo sargento e C) corpo de prova colado.	27
Figura 18: Preparação dos corpos de prova. A) Pré-furação, B) Inserção de pregos e C) inserção de parafusos auto-atarraxantes.....	27
Figura 19: Ensaio <i>push-out</i>	28
Figura 20: Gráfico de comparações da Força máxima entre todos os tratamentos	36
Figura 21: Gráfico de comparações da Tensão de Cisalhamento entre todos os tratamentos.....	37
Figura 22: Comportamento das curvas para todos os tratamentos.	38
Figura 23: Gráficos de comparações entre os tratamentos	39
Figura 24: Imagens de raios X do comportamento dos pinos metálicos	40
Figura 25: Imagens de raios X do comportamento dos pinos metálicos	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estatística descritiva dos valores da densidade básica da madeira.	25
Tabela 2 – Tratamentos dos elementos de madeira	26
Tabela 3 – Médias das forças máximas.	37

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material renovável, de baixo consumo energético de produção, alta relação resistência/massa, além de ser capaz de reter e estocar carbono em sua produção (CALIL NETO, 2014). Por ser um recurso renovável e largamente utilizado em diversas aplicações, a madeira tem sido empregada ao longo da história, para fabricação de ferramentas, objetos, transporte e moradias (WALSH-KORB; AVÉROUS, 2019). No setor da construção civil, atualmente, tem sido um dos três materiais estruturais mais utilizados, juntamente com o concreto e o aço (RAMAGE et al., 2017).

A madeira pode ainda ser considerada um material eficiente em estruturas, nas quais uma alta proporção da carga a ser resistida é a próprio massa da estrutura (RAMAGE et al. 2017). Entretanto, estruturas de madeira devem ser projetadas de modo a diminuir tensões de tração e compressão perpendicular a grã, se isto não puder ser alcançado, a mesma pode ser reforçada por meio de elementos de ligações (DIETSCH e BRANDNER, 2015). A principal vantagem que a madeira apresenta como material estrutural é a facilidade em que as partes podem ser conectadas utilizando uma enorme variedade de elementos de ligações (RAMMER, 2016). A utilização desses elementos de ligações faz-se necessária para que as peças de madeira sejam compatíveis com as solicitações mecânicas, eliminando suas limitações devido sua geometria ou dimensão (KOZERSKI, 2012 e CALIL NETO, 2014). Nesse sentido, a Norma Brasileira (NBR) 7190/1997 descreve que as ligações podem ser feitas por meio de pinos metálicos, os quais são constituídos por pregos ou parafusos e também por meio de ligações coladas.

De acordo com a literatura, sabe-se que as conexões pregadas são muito antigas, porém ainda muito praticadas por possuírem uma rápida execução, não necessitarem de equipamentos muito sofisticados, serem dúcteis e capazes de dissipar energia (MEGHLAT et al. 2013). Enquanto que, para os elementos colados, sabe-se que as tensões geradas são muito importantes no equilíbrio geral da resistência. Além disso, quanto maior a resistência da linha de cola comparada com a resistência da madeira, maior será a porcentagem de quebra ou falhas na interface com a linha de cola (BIANCHE et al. 2016). Sendo assim, o dimensionamento das ligações é considerado um dos aspectos mais importantes, pois a força e a estabilidade de uma estrutura depende dos elementos de ligação que garantem a união dos membros (RAMMER, 2016).

Apesar disso, ainda não se conhece com clareza o comportamento mecânico da madeira unida por elementos de ligação submetida ao esforço cortante. Ainda, não está

bem estabelecido qual é o procedimento mais adequado para ligação de madeiras de rápido crescimento, como os *Eucalyptus*. Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas para entender o comportamento mecânico de madeiras engenheiradas unidas por elementos de ligação. Entretanto, ao conhecimento dos autores, não há nenhum trabalho comparando o comportamento mecânico de peças de madeiras maciças de *Eucalyptus* unidas por prego, parafuso, adesivo e a combinação desses elementos de ligação. Além disso, não se conhece o efeito do tempo de cura antes da inserção de pregos e parafusos na resistência do material emendado. Sendo, portanto, de extrema relevância o estudo do comportamento mecânico da madeira e também dos elementos de ligação, de maneira a possibilitar estruturas mais seguras e eficientes.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo foi avaliar a resistência ao cisalhamento de peças de madeira de *Eucalyptus* emendadas com pregos, parafusos, adesivos e combinações desses elementos de ligações.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- a) Determinar qual elemento de ligação confere mais resistência ao cisalhamento em estruturas de madeiras submetidas ao ensaio de *push-out*;
- b) Avaliar o efeito da aplicação de cola entre as partes emendadas por pregos e parafusos na resistência do elemento estrutural;
- c) Comparar a resistência ao cisalhamento de elementos pregados imediatamente após a aplicação de cola e elementos pregados após a cura do adesivo.
- d) Analisar os modos de deformação dos pinos metálicos nas ligações por meio de imagens de raios X.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Estruturas de madeira

Há séculos a madeira é aplicada como material estrutural a fim de resolver os mais variados tipos de problemas, como por exemplo, a habitação, em razão da sua disponibilidade e versatilidade (MANERA, 2011). Sendo esta, um material reciclável e natural que representa uma boa solução para construção civil (COWLING, 1978 e JAGELS, 2006). Além disso, a madeira apresenta baixa densidade em comparação ao aço e concreto, mostrando-se eficiente para estruturas longas ou altas, nas quais parte da carga significativa a ser transportada pela estrutura é o seu próprio peso (RAMAGE et al., 2017).

Por ser um material altamente anisotrópico, com baixa capacidade em compressão perpendicular a grã, quando utilizada individualmente para fins estruturais, ela apresenta algumas limitações que podem influenciar suas aplicações (RAMAGE et al, 2017; DIETSCH E BRANDNER 2015). A execução de grandes estruturas necessita de peças maciças com comprimentos e dimensões específicas, que são uma das maiores limitações da madeira (DERIKVAND, 2019). E para viabilizar essas estruturas é preciso realizar ligações que sejam compatíveis com as solicitações mecânicas garantindo segurança, resistência e durabilidade (OLIVEIRA e DIAS, 2005).

3.2 Ligações entre elementos

Os constituintes mais críticos de qualquer estrutura de engenharia são as ligações e estas podem governar a durabilidade, funcionalidade, resistência ao fogo e a resistência global (SMITH; FOLIENSTE, 2002). Em relação à resistência da estrutura, esta será vinculada pela resistência da ligação, grandeza dos deslocamentos e o potencial de distribuição de esforços serão influenciados por sua rigidez (PORTEUS, 2007). Elementos de madeira quando são projetados devem ser destinados a diminuir tensões de compressão e tração perpendiculares a grã. E caso não seja possível ser totalmente alcançado, os elementos podem ser interligados com reforços a fim de equilibrar a baixa resistência do material em relação ao tipo de carregamento (DIETSCH E BRANDNER 2015).

Além disso, em um projeto estrutural é necessária toda atenção para as ligações, sendo estas consideradas vitais, pois caso haja falha em alguma delas, toda edificação pode ser colocada em risco (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003). Ainda, é preciso ter cuidado e atenção aos eventuais erros de execução das ligações, que poderão acarretar excentricidades que subverterão o seu funcionamento (ALMEIDA, 2012). Sabe-se que,

quando as ligações são muito resistentes e rígidas, tende a ocorrer uma ruptura brusca que não é desejada nos elementos de madeira. Dessa forma, é essencial que as ligações sejam dimensionadas objetivando a transmissão dos esforços solicitantes com alta resistência, mas sendo também responsável pela ductilidade nas estruturas (SMITH; FOLIENSTE, 2002).

Madsen (1998) estabeleceu um conjunto de requisitos, do ponto de vista estrutural que devem ser assegurados pela ligação, para que seja possível considerar que a mesma cumpra a função que foi a ela destinada.

- Resistência – A ligação deve garantir a condução de esforços entre as partes que se pretende unir. É necessário que se avaliem todos os esforços entre os elementos que serão ligados, garantindo caminho para os mesmos na ligação, de maneira que as resistências mecânicas de todos os componentes (conectores, chapas metálicas e peças a unir) sejam verificadas.
- Deformação – É necessária atenção especial a deformações das ligações. Os materiais que compõem e condicionam o comportamento das ligações, são afetados por folgas, atritos, fenômenos de fluência e erros de fabricação.
- Inversão do sentido das forças – Este aspecto assume destaque especial, pois determina a adoção de tradicionais soluções, que, geralmente, só resolvem as situações relacionadas a esforços que atuam em apenas uma direção.
- Modos de ruptura – Preferencialmente devem ser adotadas soluções cujos os modos sejam dúcteis. Por ser mais fácil de analisar cenários de ruptura que utilizem materiais que se deformam mais, são mais dúcteis e dissipam energia.
- Rigidez – Conforme já referido, a rigidez das ligações possui influência na distribuição de esforços pelos elementos.

Dessa forma, é extremamente importante a condição estética da estrutura, uma vez que uniões realizadas entre elementos de madeiras diferentes podem se tornar invisíveis. Entender os tipos de uniões dos elementos e seus comportamentos asseguram uma escolha segura, firme e econômica da ligação (DUARTE, 2004). Em estruturas, a força e estabilidade das mesmas dependem das ligações que as suas partes se mantêm unidas. A simplicidade com que suas peças possam ser ligadas são uma das vantagens da madeira como material estrutural, além de possuir diversos tipos de fixação tais como grampos, pregos, parafusos, conectores entre outros (RAMMER, 2010).

Existem três tipos básicos de ligações mecânicas entre as peças de madeira: ligações de contato, ligações coladas e ligações por pinos metálicos, que são as mais utilizadas. É possível encontrar apenas um tipo de ligação ou uma combinação entre eles em uma estrutura (DUARTE, 2004).

3.2.1 Ligação de contato

As ligações por contato são as mais simples que existem e formadas apenas com a união entre as peças de madeira, porém não garantem a continuidade das estruturas, ao menos que sejam utilizadas ligações com pinos metálicos (ALMEIDA, 2011). É necessário que os entalhes sejam executados com muita precisão, de maneira que antes do carregamento as faces transmissoras fiquem em contato e caso haja folga, a união se deformará até que as faces apoiem efetivamente (PFEIL, 2003). Os entalhes são um tipo de ligação que atende a transferência de esforços de compressão com competência, apresentando desvantagem de não ser adequada quando ocorre inversão de esforços (FARIA 2009; BRANCO 2006).

3.2.2 Ligação colada

É sabido que as primeiras substâncias utilizadas como adesivos possivelmente foram a argila e a lama, posteriormente, resinas e ceras e mais tarde o emprego de ovos, sangue, peles fervidas e ossos (STUMBO, 1965 citado por KOLMANN, 1975). Nos tempos dos faraós egípcios, as uniões de madeiras com cola já eram conhecidas, onde se utilizavam cola de osso ou de caseína. Nos últimos anos, a tecnologia relacionada a madeira / adesivo tem sido associada a tentativas de fabricar e projetar adesivos com melhor desempenho além de melhorar os já existentes (FOLLRICH et al., 2010).

Assim, para entender o processo de colagem, faz-se necessário o conhecimento de três conceitos fundamentais, segundo a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2003):

- Adesivo: Pode ser definido como uma substância que possui propriedades aderentes capaz de unir outros materiais em sua superfície;
- Adesão: Fenômeno físico-químico que oferece um mecanismo de contato entre áreas sólidas;
- Aderente: Expressão utilizada para sólidos (madeira) conectados por adesivos.

Os adesivos podem ser classificados como sintéticos ou naturais podendo ser de origem animal ou vegetal (CESAR, 2011). De acordo com Iwakiri (2005), os principais adesivos utilizados para a colagem de madeiras podem ser os naturais derivados de origem animal, tais como a albumina e caseína, derivados de origem vegetal como a soja e borracha natural. Adesivos sintéticos termoplásticos, tais como polivinil / acetato, polivinil / acrilato, polietileno, polistírol e borracha sintética. Adesivos sintéticos termoendurecedores / termofixos como uréia-formaldeído, melamina-formaldeído, fenol-formaldeído, resorcina-formaldeído, entre outros.

Por isso, os adesivos são empregados na montagem de armários e móveis, porém as principais utilizações dos adesivos são nos aglomerados, madeira compensada, madeira estrutural, janelas, portas, quadros, produtos de madeira laminada de fábrica, MDF, entre outros (VICK, 1999; FRIHART; HUNT, 2010). Adesivos são um elemento, com consequências econômicas e técnicas consideráveis na utilização da madeira, e seu custo pode ser até 50% do preço total desta (PIZZI, 1983). Em ligações, o emprego de adesivo, deve atender as prescrições técnicas comprovadamente satisfatórias e só podem ser coladas madeiras secas em estufa ou ao ar livre (NBR 7190, 1997).

A união entre os elementos de madeira está sujeita a uma gama de critérios referentes às características físico químicas do adesivo, da metodologia adotada na colagem, do material a ser colado, da forma geométrica e do tamanho das peças a serem coladas, e também, das circunstâncias em que as peças serão coladas e expostas, quando em utilização (SOBRAL FILHO, 1982; MARRA, 1992). A junta a ser colada deve possuir resistência no mínimo igual a à resistência ao cisalhamento longitudinal da madeira. (NBR 7190, 1997).

As tensões geradas no elemento colado são de extrema importância para o equilíbrio geral da resistência, e essas tensões originadas na linha de cola se apresentam através de tensões de cisalhamento no plano de colagem e perpendicular a ela (PINTO, 2011). A resistência das ligações dos elementos de madeira por adesivo está sujeita a força de cada elemento envolvido na união. Grande parte dos adesivos são polímeros reativos que se transformam de líquido para sólido através de reações de polimerização. A função dos adesivos é realizar ligação química entre as peças de madeira (CARNEIRO, 2010).

A densidade é uma propriedade física extremamente importante para a colagem da madeira, uma vez que madeiras com densidade elevada possuem maior alteração dimensional ocasionando em maiores tensões na linha de cola. Entretanto, madeiras que apresentam baixa densidade, são mais porosas e ocorre uma excessiva penetração de

adesivo (VICK, 1999). A eficácia do adesivo na ligação de juntas coladas em condições características de umidade e temperatura durante um período de tempo específico deve ser avaliada a partir de testes de carga específica, como o cisalhamento na linha de cola (BIANCHE et al. 2016).

3.2.3 Ligações por pinos metálicos

As ligações por pinos metálicos exemplificadas pelos pregos e parafusos são as mais utilizadas na construção civil, pois apresentam fácil instalação e possibilidade de utilização em diversas configurações de ligações (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS 2003).

Ligações pregadas

Pregar é o método mais utilizado para unir membros nas estruturas de madeira (PORTEUS e KERMANI, 2007). As ligações pregadas são muito utilizadas em montagens de estruturas, denominadas definitivas, as quais são muito utilizadas por apresentarem baixo custo e facilidade de aplicação (PFEIL, 2003). Para ligações pregadas, a NBR 7190 (1997) determina que será obrigatória a pré-furação da madeira, de modo que o diâmetro d_0 (diâmetro da pré-furação) não seja maior que def (diâmetro medido nos pregos), respeitando os valores usuais para coníferas de $0,85 \times def$ e para folhosas de $0,98 \times def$.

Somente em estruturas provisórias, é aceitável a utilização de ligações pregadas sem a pré-furação da madeira, desde que sejam empregadas madeiras de baixa densidade, $\rho_{ap} \leq 600 \text{ kg/m}^3$, que possibilitem a penetração dos pregos sem risco de fendilhamento (NBR 7190, 1997). ALMEIDA (1987) analisou que a diferença entre o diâmetro do prego e da pré-furação deve ser razoavelmente pequena, de maneira que as tensões resultantes não fendilhem a madeira. Durante a cravação dos pregos, não é possível observar macroscopicamente o fendilhamento, porém microscopicamente ocasiona o afrouxamento entre madeira e prego, perdendo, nessa união, parte do resultado positivo do ajuste produzido pela penetração do prego na madeira (OLIVEIRA; DIAS, 2005).

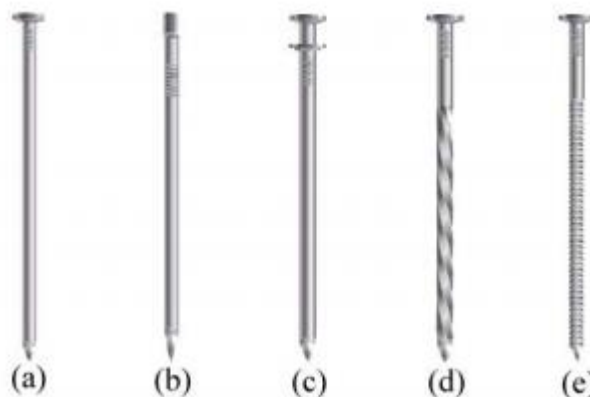
Além disso, na era moderna, os pregos surgiram como a primeira tecnologia e eram utilizados como elemento para assegurar a estabilidade da união, pois constituem um conector vulgar, simples e de fácil aplicação (CALIL NETO, 2014). Atualmente são utilizados em estruturas definitivas e também em provisórias, como na montagem de formas para a construção civil, onde são empregados no formato de duas cabeças, para facilitar a extração na desforma (PFEIL, 2003). Para estruturas de madeira, os pregos necessitam apresentar uma resistência a tração de no mínimo 600 MPa e são produzidos a

partir de aço que podem ser galvanizados, envernizados ou revestidos de polímeros, variando de acordo com a utilização e ao ambiente onde serão empregados (PORTEUS, 2007).

Dentre as formas que os pregos podem ser cravados na madeira, também é possível cravá-los com a cabeça embutida, porém essa configuração diminui a eficácia da ligação e é necessário que o comprimento de penetração seja considerado a partir de sua cabeça (DUARTE 2004). Em uso, os pregos resistem a cargas laterais, cargas de retirada ou uma combinação dos dois (RAMMER, 2010). Os pregos são pinos mais simples em relação aos parafusos e podem ser encontrados em vários tipos e tamanhos (ALMEIDA 2011). Estes são fixadores retos e delgados, em geral, possuem cabeça e são pontiagudos, além de estarem disponíveis em diversas formas, comprimentos e áreas de seção transversal (PORTEUS E KERMANI, 2007).

Os modelos mais empregados atualmente disponíveis no mercado estão exemplificados na Figura 1, sendo eles, pregos sem cabeça, pregos com cabeça de fuste circular cilíndrico, prego ardox, prego com cabeça dupla, e prego anelado, respectivamente (JUNIOR, 2017).

Figura 1: Tipos de pregos: (a) Prego comum com cabeça (b) Prego comum sem cabeça (c) Prego com duas cabeças (d) Prego ardox (e) Prego anelar



Fonte: Duarte (2004).

Ligação parafusada

Em ligações nas quais há a necessidade de transmitir maiores forças, especialmente em situações em que é preciso atribuir a união de elementos maior resistência ao arranque, os parafusos assumem maiores vantagens em relação aos pregos (PORTEUS E

KERMANI, 2007). Nesse sentido, sabe-se que, essencialmente, existem, dois tipos de parafusos, os do tipo comuns e os auto-atarraxantes, os primeiros penetram toda a peça de madeira recebendo em sua extremidade uma porca, enquanto que os auto-atarraxantes não necessitam de porcas e apresentam uma ponta na extremidade oposta a cabeça que não penetra completamente as peças da ligação (DUARTE, 2004). Os parafusos para madeira jamais podem ser martelados, devem sempre ser fixados ao serem rosqueados na madeira (PORTEUS E KERMANI, 2007). Normalmente são produzidos em aço, latão ou outros metais e ligas, podendo apresentar acabamentos específicos. Eles podem ser classificados segundo o tipo, material, acabamento e bitola ou diâmetro da haste (RAMMER, 2010).

Parafusos auto-atarraxantes

Os parafusos auto-atarraxantes representam um tipo de elemento que pode ser aplicado em uniões de madeira-madeira, madeira aço e também em produtos provenientes de madeira (ALMEIDA, 2012). Estes são reconhecidos como o mais alto desenvolvimento na tecnologia em conectores para estruturas em madeira (DIETSCH e BRANDNER, 2015). Pois, o fio proporciona uma mecânica contínua da conexão em todo o comprimento incorporado, tornando eficientes os parafusos auto-atarraxantes para reforço de elementos de madeira e em conexões propensas a rachar (TANNERT e LAM, 2009).

Os parafusos auto-atarraxantes penetram por rotação na madeira e são produzidos de aço endurecido e roscas contínuas a fim de alcançar um alto rendimento e eficiência, apresentam resistência a torção e tração, elevada resistência a retirada e rápida instalação (CALIL NETO, 2014; DIETSCH e BRANDNER, 2015). Estes possuem uma ponta no formato de broca para cortar material de aço e madeira, que extinguem a necessidade de pré-furação (RAMMER, 2010). Além de serem benéficos em uniões em que o comprimento requerido do parafuso é muito grande ou quando é restrito o acesso a um lado da ligação (DUARTE, 2004).

Dentre as diversas vantagens que os parafusos auto-atarraxantes apresentam, eles são menos agressivos às peças de madeira, devido ao fato de serem introduzidos em apenas um lado da união onde a ponta sempre fica embutida na peça.

Atualmente estão disponíveis no mercado várias tipologias de parafusos auto-atarraxantes desenvolvidos nas últimas duas décadas para utilização em madeira e que apresentam ampla variedade de aplicações estruturais (DIETSCH e BRANDNER, 2015). Eles podem ser classificados de acordo com a parte rosqueada do fixador em três categorias principais, como os parafusos parcialmente rosqueados, também nomeados como rosca

única, parafusos de rosca dupla e parafusos totalmente rosqueados ou com rosca total. Existem ainda parafusos que não se encaixam adequadamente em nenhuma dessas três classificações, pois foram projetados para utilizações especiais, como a união de madeira com outros materiais, como aço ou concreto (SCHIRO et al. 2018). Na Figura 2, pode-se observar alguns tipos de parafusos auto-atarraxantes que são utilizados em uniões de madeira.

Figura 2: Tipos de parafusos auto-atarraxantes para madeira.



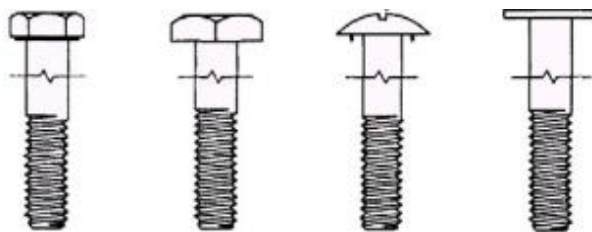
Fonte: Porteus e Kermani (2007).

Parafusos comuns

Os parafusos comuns geralmente são nomeados apenas como parafusos e constituem um tipo de conector em que sua utilização é bastante difundida devido as diversas configurações existentes para o tipo de cabeça dos parafusos, sendo as mais comuns: cabeça quadrada, sextavada, oval e chata (DUARTE, 2004; CALIL NETO, 2014). Tais conectores apresentam superfície lisa com uma ponta rosçada que permite parafusar a porca e essa associação com o emprego de arruelas nos dois topos possui grande importância na distribuição da força perpendicular as fibras, pois impede o esmagamento generalizado da madeira (CALIL NETO, 2014).

Na Figura 3, é possível observar os tipos de parafusos comum e de acordo com Soltis (1997), os parafusos de cabeças sextavadas ou quadradas são usados quando estas estão em contato com madeira ou com aço. Bem como os parafusos de cabeça oval e reta que possuem diâmetros da cabeça maiores e são usados com a cabeça em contato com a madeira. Os parafusos de cabeça oval também podem ser encontrados com uma fenda e projeções na cabeça que facilitam a sua instalação e aperto (SOLTIS, 1997).

Figura 3: Tipos de parafusos comuns



Fonte: Soltis (1997).

3.3 Comportamento mecânico de peças ligadas – Teoria de Johansen

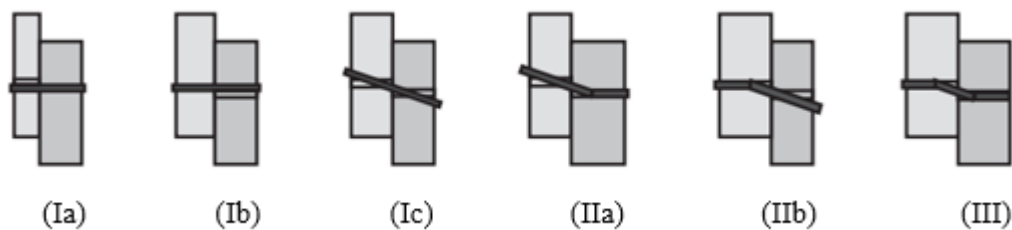
Johansen (1949) elaborou o trabalho mais importante a respeito da resistência de ligações com pinos metálicos, posteriormente foi complementado dando origem ao EYM (European Yield Model), que atualmente ainda serve como base em vários documentos normativos, dentre eles o EUROCODE 5/04 e a NBR 7190/97 (MAIA, 2016).

Para elaborar sua teoria, Johansen (1949) admitiu para o pino metálico e para a madeira, um comportamento perfeitamente plástico. Disse que a resistência das ligações unidas por pinos depende da resistência do pino a flexão (M_y) e da resistência da madeira ao embutimento do pino (f_e). Fundamentado nisso, desenvolveu as equações para cada modo de ruptura utilizando o princípio do equilíbrio das forças. Na qual, por meio de ensaios, observou que as falhas das ligações aconteciam de maneiras diferentes.

Os modos de ruptura são fundamentados na associação dos fenômenos de flexão do pino metálico e embutimento da madeira em cada peça, originando seis modos de falha para uma seção de corte, denominados Ia, Ib, Ic, IIa, IIb e III, além de quatro modos de ruptura para as uniões com duas seções de cortes Ia, Ib, II e III (Figuras 4 e 5).

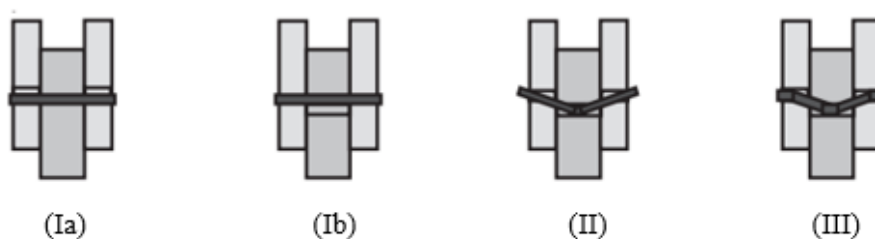
Nas Figuras 4 e 5 podemos observar que para as seções de corte, tanto simples quanto duplas, nos modos de falha Ia e Ib a falha acontece pelo embutimento da madeira somente em uma das partes, sem que ocorra deformação no pino metálico. O modo Ic dá-se apenas em seção de corte simples, onde ocorre simultaneamente nas duas peças o embutimento da madeira sem que haja deformação do pino metálico. Em IIa e IIb acontece o embutimento nas duas peças e o pino metálico deforma em consequência a flexão em uma das peças, com a ocorrência de uma rótula plástica apenas. No modo III a deformação no pino metálico ocorre em razão da flexão e embutimento da madeira nas duas peças formando duas rótulas plásticas (MAIA, 2016).

Figura 4: Modos de falha (EUROCODE) para uma seção de corte.



Fonte: Porteous e Kermani (2007).

Figura 5: Modos de falha (EUROCODE) para duas seções de corte.



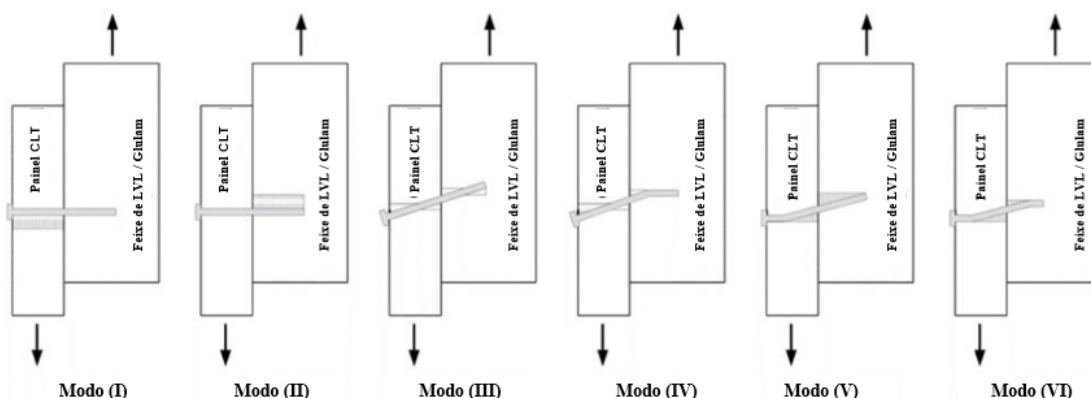
Fonte: Porteous e Kermani (2007).

3.4 Principais estudos envolvendo resistência em peças ligadas

Estudos envolvendo o comportamento dos pinos metálicos em uniões de madeira tem se tornado cada vez mais frequentes, tal como Hassanieh e colaboradores (2016) que avaliaram o comportamento de pinos metálicos em madeira laminada (LVL). Na maioria das estruturas em madeira são considerados como um elemento crítico e é possível definir a eficiência de uma conexão como a razão entre a força da conexão e a força do elemento que a conecta (RAMAGE et al., 2017).

Nouri et al. (2019) analisaram o comportamento de painéis e madeira laminada cruzada (CLT) unidos a vigas de LVL e Glulam por parafusos de três diferentes bitolas (12, 16 e 20 mm), a fim de criar um membro composto de madeira-madeira (TTC), conforme Figura 6. Para isso, testes *push-out* foram realizados para verificar os modos de falha dos componentes e o comportamento de escorregamento de carga. E investigaram o comportamento estrutural dos membros do TTC em relação ao tamanho e a inclinação do parafuso, a distância da borda em conjunto com o tipo de vigas de madeira (softwood, hardwood, LVL, Glulam) e o efeito da orientação da lamela CLT.

Figura 6: Diferentes modos de falha nas articulações do composto madeira-madeira.



Fonte: Nouri et al. (2019).

Dessa forma, diante do trabalho de Nouri e colaboradores (2019), houve a conclusão que o modo de falha predominante nas juntas CLT-LVL com parafusos inclinados foi associado ao esmagamento lateral da madeira e a formação de uma rótula plástica dentro dos conectores embutidos no painel CLT. Enquanto das juntas CLT-LVL / Glulam com cisalhamento normal dos parafusos o modo de falha apresentou uma rótula plástica formada nos conectores embutidos no painel CLT ou duas rotulas plásticas desenvolvidas dentro do comprimento do conector (Figura 7).

Figura 7: Modos de deformações nos pinos metálicos e falha da viga.



Fonte: Nouri et al. (2019).

Chybiński e Polus (2019) investigaram o comportamento estrutural de vigas de alumínio- madeira composta (ATC). Estes observaram que dentro das vigas feitas de liga de alumínio AW-6060 T6, foi conectada por oito parafusos de cabeça sextavada galvanizado a quente, uma laje de madeira, conforme podemos observar na Figura 8. Nas vigas ATC foram realizados testes *Push-out* para analisar comportamento a curto prazo, determinar sua resistência à flexão e capturar o modo de falha nos conectores sextavados.

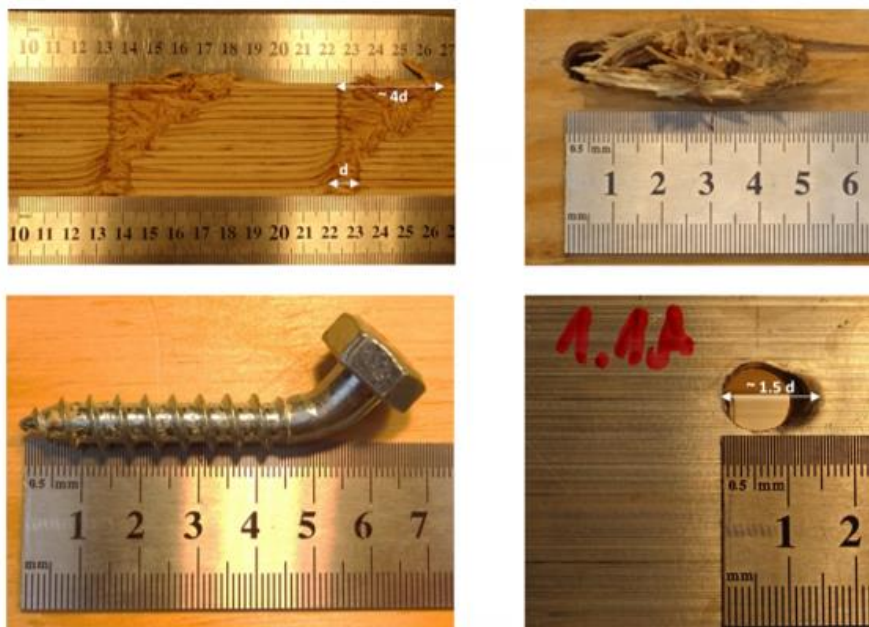
Figura 8: Viga de alumínio- madeira composta (ATC).



Fonte: Chybiński e Polus (2019).

Ainda segundo Chybiński e Polus (2019), os testes *Push-out*, demonstraram um modo distinto de falha, conforme pode ser observado na Figura 9. Houve um esmagamento da madeira e também a formação de uma dobradiça plástica dentro do parafuso na interface alumínio madeira e também uma ovalização do orifício na flange da viga de alumínio.

Figura 9: Modo de falha na conexão parafusada.



Fonte: Chybiński e Polus (2019).

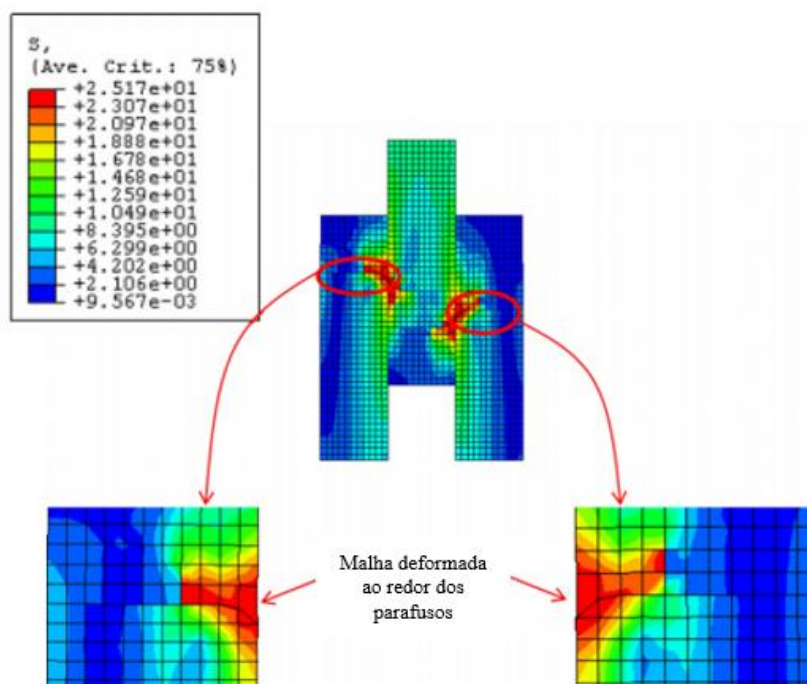
Meghlat et al. (2013) investigaram o comportamento de uniões de madeiras parafusadas considerando vários diâmetros ($d= 3,1$ mm; $d= 3,8$ mm e $d= 5,5$ mm) e como os mesmos influenciam na curva global de carga-deslizamento. Diante disso, a estrutura

para teste de cisalhamento foi composta por três membros de madeira de abeto, com dimensões de 55 mm x 55 mm x 200 mm, os quais foram interligados por dois parafusos, sendo um de cada lado.

Em seguida módulo de deslizamento foi determinado por meio do teste de cisalhamento *push-out* segundo a norma europeia EN 26891:1991. Os critérios do procedimento de carregamento foram determinados baseados na carga máxima estimada (F_{max}), adquirida do teste preliminar conduzido até a falha. As conexões foram carregadas até 40% da F_{max} a posição da cabeça cruzada por 30 segundos. Posteriormente foram descarregadas até 10% da F_{max} mantendo por 30 segundos a posição da cabeça cruzada e finalmente foram carregadas até atingir um deslizamento de 16 mm.

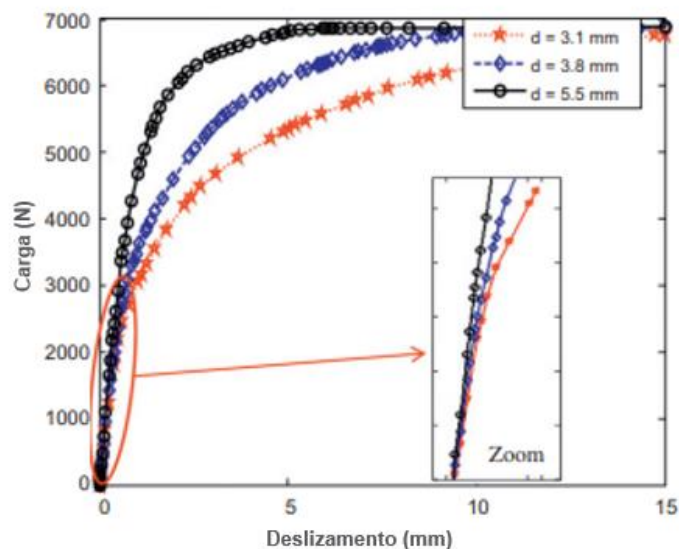
Na Figura 10 é possível observar como ocorreram as deformações no interior da peça de madeira, sob um deslocamento de 15 mm. As tensões se concentraram em torno dos dois parafusos e é possível observar que as tensões foram maiores na extensão das profundidades do parafuso do que em outras partes dos membros de madeira. Analisaram as curvas de deslizamento de carga, eles concluíram que o diâmetro do parafuso possui uma leve influência no comportamento elástico, sendo que a mesma é ainda menor na região pós elástica (Figura 11).

Figura 10: Distribuição das tensões equivalentes dentro dos elementos de madeira.



Fonte: Meghlat et al. (2012).

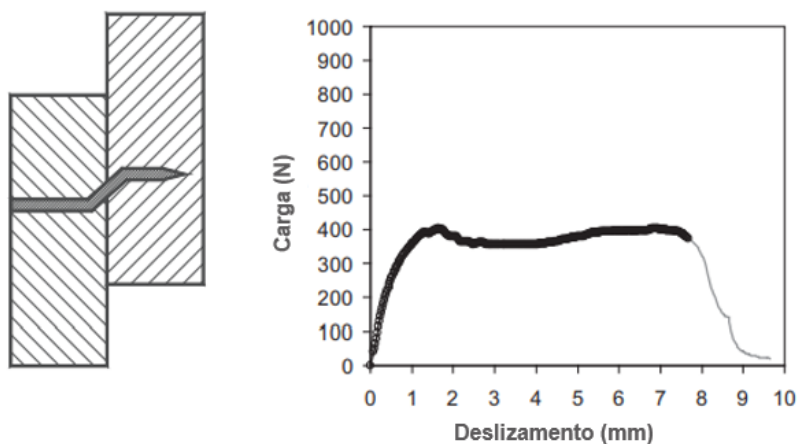
Figura 11: Influência do diâmetro do parafuso na curva de deslizamento de carga.



Fonte: Meghlat et al. (2013).

Riggio et al. (2016) analisaram a possibilidade de utilização de conectores a base de madeira para substituir fixadores de metal. Eles monitoraram o comportamento de compressão dos pregos de madeira adensada, realizando 600 ensaios de compressão em pregos de quatro espécies diferentes de madeira de lei, além de dez ensaios *Push-out* em juntas de madeira para madeira, posteriormente verificaram o comportamento dos elementos por meio de raios X (Figura 12).

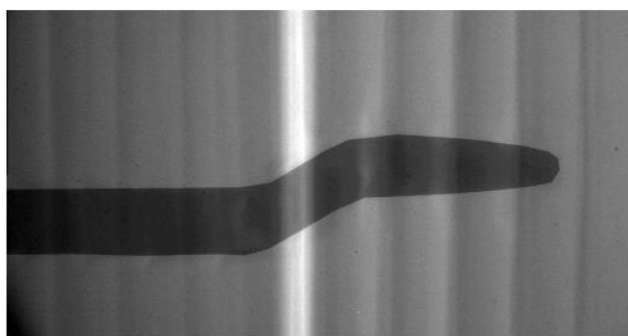
Figura 12: Influência do diâmetro do parafuso na curva de deslizamento de carga.



Fonte: Riggio et al. (2016).

Os modos de falha foram observados com base em análise qualitativa da curva de carga-deslizamento e puderam ser observados dois comportamentos diferentes na fase pós elástica: quando maiores valores de carga foram alcançados ocorreu uma falha na articulação frágil, seguido por uma ágil inversão da carga/deslizamento. No primeiro modo a união falhou em consequência ao cisalhamento do prego, enquanto no segundo ocorreu uma formação de uma dobradiça plástica conforme Figura 13. Os autores concluíram que a aplicação de conectores de madeira é indicada para novas montagens ou em restauração e reparo de trabalhos, pois apresentaram resistência inferior aos pregos produzidos em aço.

Figura 13: Deformação do elemento metálico.



Fonte: Riggio et al. (2016).

4 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 14 apresenta um resumido fluxograma das etapas realizadas no presente trabalho que serão descritas a seguir.

Figura 14: Fluxograma das etapas executadas no trabalho.



Fonte: Da autora (2020).

4.1 Obtenção das peças de madeira

As amostras utilizadas na pesquisa foram retiradas de híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, com seis anos de idade, fornecidas pela empresa Cenibra S.A, localizada em Belo Oriente, estado de Minas Gerais. As árvores foram abatidas e seccionadas em toras da base.

Após chegarem a Universidade Federal de Lavras (UFLA), as toras foram desdobradas na Unidade Experimental de Desdobro e Secagem da Madeira, onde processou-se a prancha central em corpos de prova com dimensões de 2,5 x 2,5 x 10 cm. A seleção dos corpos de prova foi realizada em função da ausência de defeitos, tais como rachaduras, nós ou qualquer outra inconformidade que comprometesse a utilização do material para a pesquisa. Logo após a seleção, os materiais foram classificados pela densidade aparente para obter um lote de material mais representativo e uniforme possível.

A madeira utilizada estava em uma umidade de 12% e a estatística descritiva para a densidade aparente da madeira utilizada foi detalhada na Tabela 1, a qual contém a média, o valor mínimo e máximo, o coeficiente de variação e o número de amostras.

Tabela 1 – Estatística descritiva dos valores da densidade aparente da madeira (ρ_{ap}).

	Média	Min	Max	CV (%)	n
ρ_{ap} (g/cm ³)	0,59	0,53	0,64	5,76	90

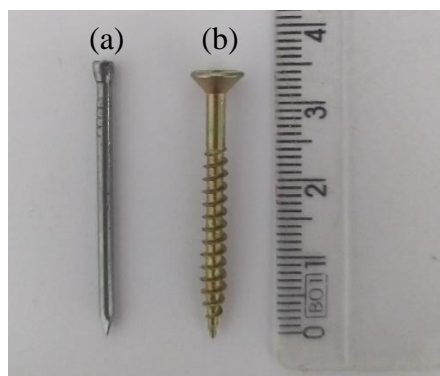
ρ_{ap} – Densidade aparente; Min – mínimo; Max – máximo; CV (%) – coeficiente de variação; n – número de amostras.

Fonte: Da autora (2020).

4.2 Elementos de ligação

Para a união dos corpos de provas, utilizou-se três tipos de elementos de ligação: cola, pregos e parafusos. Foram utilizadas 120 unidades de pregos do tipo sem cabeça, de aço polido, corpo liso, ponta diamante e dimensões de 2,5 cm x 35 mm, conforme Figura 15- a. Os parafusos foram do tipo auto atarraxante, em aço, fenda Philips, cabeça trombeta e ponta agulha, com bitolas de 3,5 cm x 35 mm, totalizando 80 unidades (Figura 15- b). O adesivo utilizado para as ligações coladas, foi o acetato de polivinila com gramatura aplicada de 250 g/m².

Figura 15: Pinos metálicos utilizados nos corpos de provas.

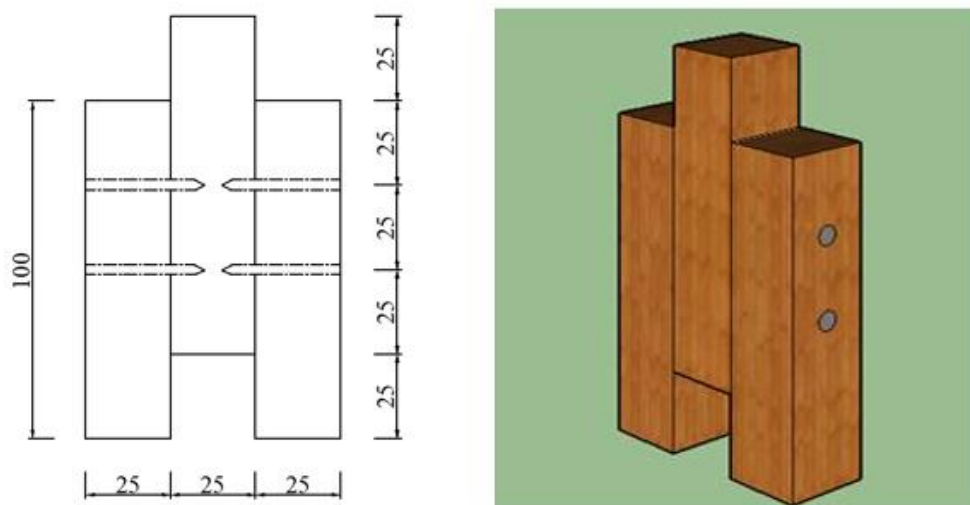


Fonte: Da autora (2020).

4.3 Preparação dos corpos de prova e tratamentos

Para a execução dos ensaios experimentais de *push-out*, foram confeccionados 60 corpos de prova conforme a Figura 16, compostos por três lamelas de madeira com dimensões de 25 x 25 x 100 mm, os quais foram interligados em situações distintas (Tabela 2).

Figura 16: Configuração dos corpos de prova.



Fonte: Da autora (2020).

Tabela 2 – Tratamentos dos elementos de madeira

Tratamentos	n
Elemento colado	10
Elemento pregado	10
Elemento colado e pregado	10
Elemento colado e pregado imediatamente	10
Elemento parafusado	10
Elemento colado e parafusado imediatamente	10
Total	60

n – Número de repetições

Fonte: Da autora (2020).

Foram confeccionados dez corpos de provas para cada tipo de tratamento. Na Tabela 2, pode-se observar os tratamentos que foram realizados. Sendo que, no primeiro os corpos de prova foram unidos apenas com o adesivo de acetato de polivinila, o qual foi aplicado por meio de um bico plástico, espalhado com o auxílio de um pincel em apenas uma das faces dos dois elementos em uma área de colagem de 18,75 cm². O adesivo utilizado possuía teor de sólidos de 30,5%, viscosidade de 15090,91 cP, pH de 5,1 e Gel Time de 17m12s. Posteriormente, as lamelas foram unidas, alinhadas e prensadas por meio de grampos tipo sargento, aguardando a secagem completa do adesivo (Figura 17). É importante destacar que, para efeito de comparação entre tratamentos, nos corpos de prova

apenas pregados e parafusados (sem cola) a área crítica depende da dimensão dos elementos de ligação, e não da área colada de $18,75 \text{ cm}^2$.

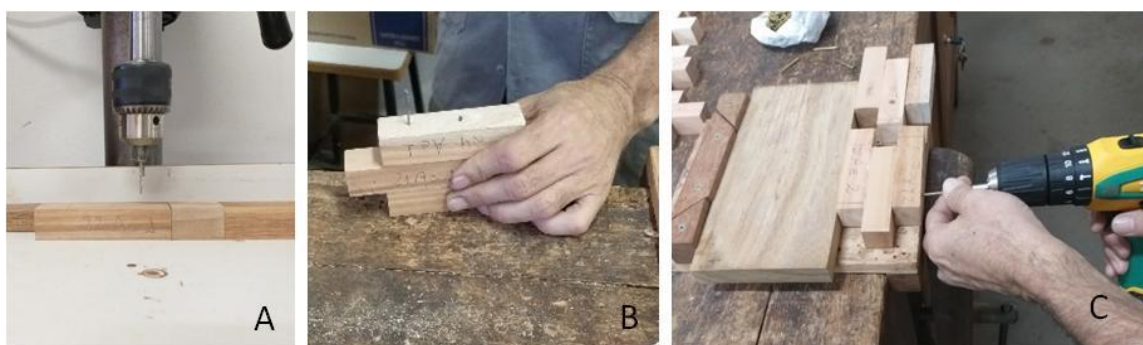
Figura 17: Execução dos corpos de prova colados. A) Aplicação do adesivo, B) Sistema de prensagem com grampo sargento e C) corpo de prova colado.



Fonte: Da autora (2020).

No segundo tratamento, os elementos foram interligados apenas com os pregos sem cabeça (dois de cada lado), a uma distância de 2,5 cm entre os elementos. Os mesmos foram pré-furados em furadeira de bancada com broca de 2 mm e posteriormente foram unidos com os pregos (Figura 18 A e B).

Figura 18: Preparação dos corpos de prova. A) Pré-furação, B) Inserção de pregos e C) inserção de parafusos auto-atarraxantes.



Fonte: Da autora (2020).

Para o tratamento colado e pregado, repetiu-se todo o procedimento de colagem como no primeiro tratamento, após a secagem do adesivo os elementos foram pré-furados com broca de 2 mm, em furadeira de bancada e posteriormente unidos com os pregos.

Enquanto que, para o tratamento colado e pregado imediatamente, os elementos foram pré-furados inicialmente em furadeira de bancada com broca de 2 mm. Posteriormente, repetiu-se a metodologia de aplicação do adesivo como no primeiro tratamento e imediatamente após a aplicação os elementos foram unidos com os pregos.

No tratamento parafusado (Figura 18 C), os elementos foram fixados apenas com parafusos. Inicialmente foram pré-furados em furadeira de bancada com broca de 2,5 mm e posteriormente unidos com os parafusos (dois de cada lado). Para o tratamento parafusado e colado imediatamente, os elementos foram pré-furados em furadeira de bancada com broca de 2,5 mm em seguida foi realizada a aplicação do adesivo conforme foi executado no tratamento colado e imediatamente após a aplicação, foram unidos com os parafusos (dois de cada lado).

4.4 Ensaio mecânico

Os testes *push-out* foram conduzidos utilizando as condições de Meghlat et al. (2012) para ligações semelhantes unidas com parafusos e os mesmos foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio modelo EMIC-30 kN. O *setup* utilizado foi o de compressão especificado na Norma Brasileira ABNT 7190/1997, com célula de carga com capacidade de dez toneladas e velocidade de carga de 1 mm/minuto. Os parâmetros do procedimento de carregamento foram definidos com base na carga máxima estimada (F_{max}), que foi obtida pelo teste preliminar unido com pregos e conduzido até a falha (Figura 19). No total, foram realizados 60 testes de *push-out* para avaliar a resistência do elemento.

Figura 19: Ensaio *push-out*.



Fonte: Da autora (2020).

4.5 Análise das deformações

As deformações ocorridas nos pinos metálicos foram analisadas através de imagens obtidas por meio de raios X, que possibilitaram classificar os modos de deformação propostos na teoria de Johansen, conforme executado por Nouri et al. (2019).

4.6 Análise estatística

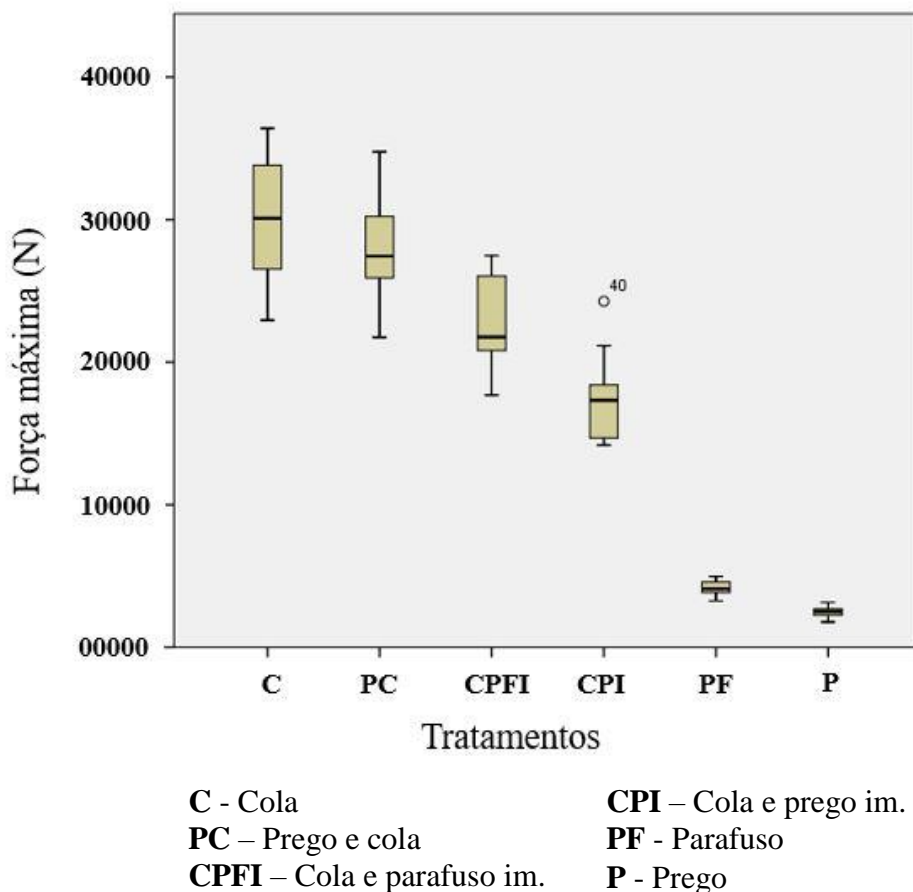
O *software* estatístico “SPSS Statistics v.19” foi utilizado para determinação das estatísticas descritivas, análises de variância e comparação múltipla de médias (Tukey, $\alpha=0,05$). Para a análise de variância, foram considerados como fonte de variação o tipo de ligação. Os gráficos foram feitos no *software* Graph Pad Prisma versão 5.01 para Windows (GraphPad Software, La Jolla, CA, USA).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resistência ao cisalhamento em estruturas de madeiras submetidas ao ensaio de *push-out*

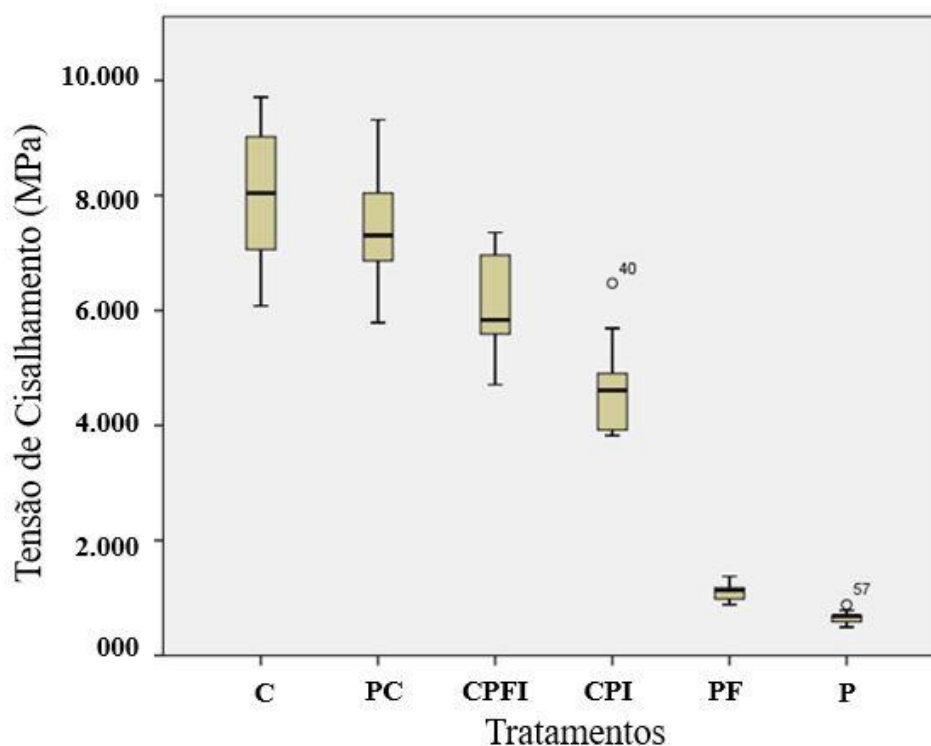
Realizou-se a comparação da força máxima (Figura 20) e tensão de cisalhamento (Figura 21) entre todos os tratamentos comparando dois a dois por meio de análise estatística. Diante disso, encontrou-se diferença significativa para todas as combinações, exceto para as comparações Cola^a com Cola e Pregos^a e Parafuso^d com Pregos^d (Tabela 3). Nas Figuras 20 e 21, é possível observar valores bem próximos das médias da Força máxima e Tensão de cisalhamento para as duas combinações (C + CP e PF + P), os quais não apresentaram diferença significativa.

Figura 20: Gráfico de comparações da força máxima entre todos os tratamentos.



Fonte: Da autora (2020).

Figura 21: Gráfico de comparações da tensão de cisalhamento entre todos os tratamentos



Fonte: Da autora (2020).

Individualmente foi investigada a força máxima (N) que os três tratamentos Cola (C), Pregos (P) e Parafusos (PF) suportaram, a fim de descobrir qual elemento de ligação confere maior resistência ao cisalhamento quando submetidos ao ensaio de push-out, e também qual a tensão de cisalhamento para cada tratamento. Dentre os três analisados, o elemento Cola (C) foi o mais resistente, apresentando maiores valores de força máxima (30276.95 N). Enquanto que, o elemento Pregos (P) foi o menos resistente, apresentando os menores valores de força máxima (2481.77 N), conforme pode ser observado na Tabela 3. Não existe na literatura nenhum trabalho analisando as situações executadas em madeira maciça.

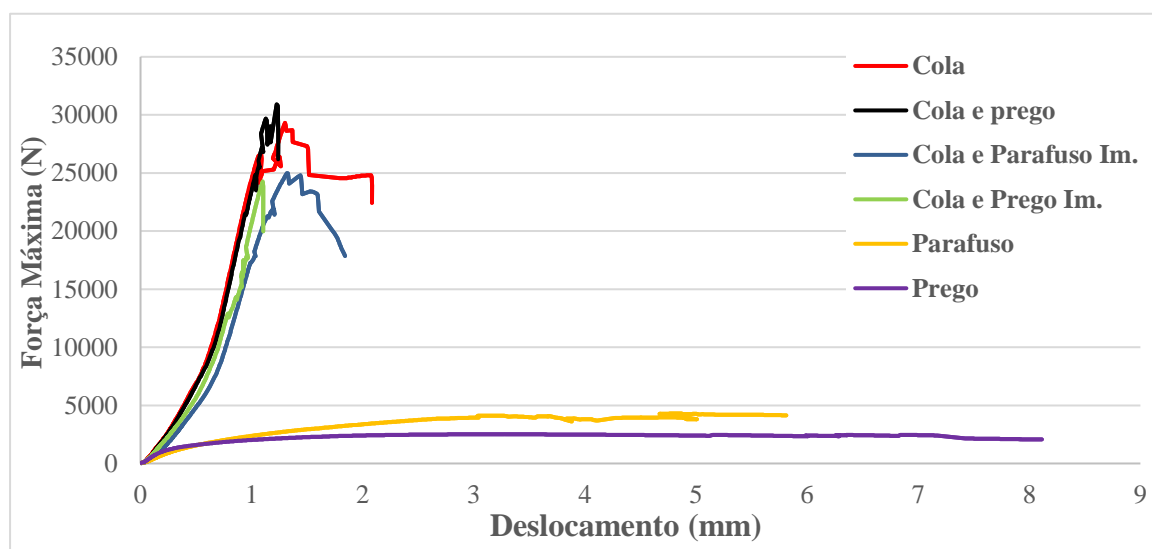
Tabela 3 – Médias das forças máximas.

Sigla	Tratamentos	Força Máxima (N)
C	Cola	30276.95 ^a
CP	Cola e Pregos	27913.55 ^a
CPF	Cola e Parafusos Imediatamente	22969.63 ^b
CPI	Cola e Pregos Imediatamente	18435.42 ^c
PF	Parafusos	4136.64 ^d
P	Pregos	2481.77 ^d

Fonte: Da autora.

Analisando ainda o comportamento dos três elementos em curva de Força x Deslocamento (Figura 22), o elemento cola exibiu um comportamento mais tenaz, pois embora resista a maiores valores de força máxima apresenta uma deformação bem pequena antes da falha da estrutura. Já os pinos metálicos, prego e parafuso, apresentam comportamento dúctil, pois exibem maiores valores de deformação em função do aumento da força máxima aplicada.

Figura 22: Comportamento das curvas para todos os tratamentos.



Fonte: Da autora (2020).

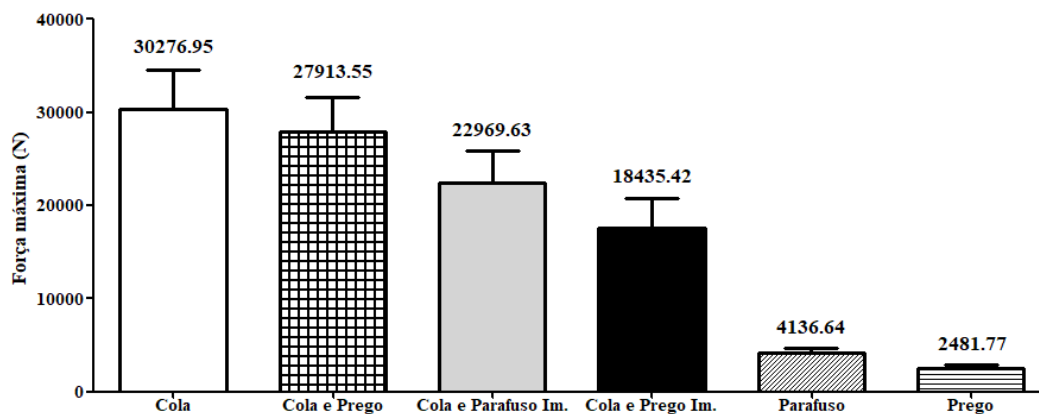
5.2 Efeito da aplicação de cola na resistência entre as partes

Foi investigado também a combinação entre os elementos Cola e Pregos Imediatamente (CPI) e Cola e Parafuso Imediatamente (CPFI) de modo que fosse possível elucidar se a resistência era aumentada com a adição da cola entre as partes. Foi encontrado que para as duas combinações analisadas, a aplicação de cola entre as partes não garantiu um valor de resistência cumulativo. Ao contrário, os valores de CPI e CPFI foram inferiores que o tratamento que recebeu apenas cola, conforme pode ser observado na Figura 23.

Hassanieh e colaboradores (2016) testando a combinação de parafusos e cola em madeira LVL, encontrou uma rigidez elevada e também valores de resistência superiores aos elementos que foram somente parafusados. Entretanto, os autores não analisaram a resistência do elemento só colado para elucidarem se a resistência era cumulativa quando adicionaram os parafusos juntamente com a cola. Os resultados dos autores foram bem semelhantes aos que obtivemos neste trabalho, e observamos que a adição da cola em

elementos unidos com pinos metálicos aumenta a resistência ao cisalhamento, entretanto elimina o comportamento dúctil dos pinos metálicos e passa a apresentar um comportamento bem mais rígido (Hassanieh et al., 2016).

Figura 23: Gráficos de comparações entre os tratamentos



Fonte: Da autora (2020).

Diante dos valores encontrados nas combinações, foi necessário descobrir se a cura do adesivo estava relacionada com os valores inferiores ao esperado encontrado nos dois tratamentos analisados (CPI e CPFI). Foi investigado então a força máxima para o tratamento Cola e Prego (CP), de maneira a elucidar se ao esperar a cura completa do adesivo os valores seriam cumulativos (Cola + Prego) ou inferiores. Foi encontrado que a cura do adesivo antes da aplicação dos pregos não aumenta a resistência do elemento, uma vez que os valores de força máxima foram maiores que o tratamento Cola e Prego imediatamente, porém ainda foram inferiores aos que receberam só cola (Figura 23).

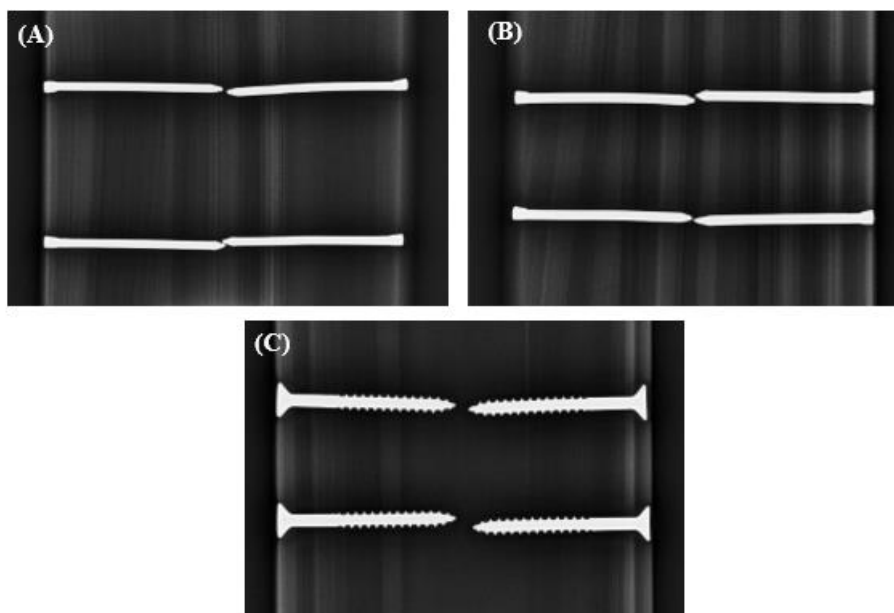
Acredita-se que o valor da resistência dos tratamentos pregados e colados imediatamente (CPI) foi inferior aos que foram colados e pregados (CP) após a cura do adesivo, pois eles não foram prensados até que a cura fosse finalizada. Bianche et al. (2016) avaliando a resistência ao cisalhamento na linha de corte de madeira, realizaram metodologia de colagem das peças semelhante as executadas neste trabalho, porém os elementos foram prensados até a cura do adesivo e os resultados das resistências obtidas foram satisfatórios. Pressupõe ainda, que por não ter realizado a prensagem na colagem dos elementos que foram pregados e parafusados influenciou na resistência final e por isso

não foi cumulativa. Novos ensaios poderiam ser realizados analisando o comportamento dos pregos e parafusos unidos imediatamente a colagem, prensando até a cura do adesivo, conforme o que foi realizado para o tratamento Cola e Prego (CP). E então elucidar se a resistência final quando adiciona o adesivo é o somatório das resistências individuais.

5.3 Análise dos modos de deformação por raios - X

Além disso foi analisado o comportamento dos pinos metálicos em cada tratamento por meio de Raios X de maneira a determinar os modos de deformação de cada elemento metálico segundo a Teoria de Johansen. Para os três tratamentos que receberam a aplicação de cola (Cola e Prego; Cola e Prego Imediatamente; Cola e Parafuso Imediatamente), o comportamento dos pinos metálicos foram semelhantes. Não houve deformação nos pinos conforme pode ser observado na Figura 24 – A, B e C. A mesma situação foi encontrada por Hassanieh et al. (2016) quando adicionaram cola no elemento unido por parafusos e não houve deformação nos pinos utilizados. De acordo com os valores obtidos no ensaio de push-out e a imagens de raios X, acredita-se que quando utilizados junto com a cola, os pinos metálicos não oferecem nenhuma contribuição para a resistência final do elemento estrutural.

Figura 24: Imagens de raios X do comportamento dos pinos metálicos

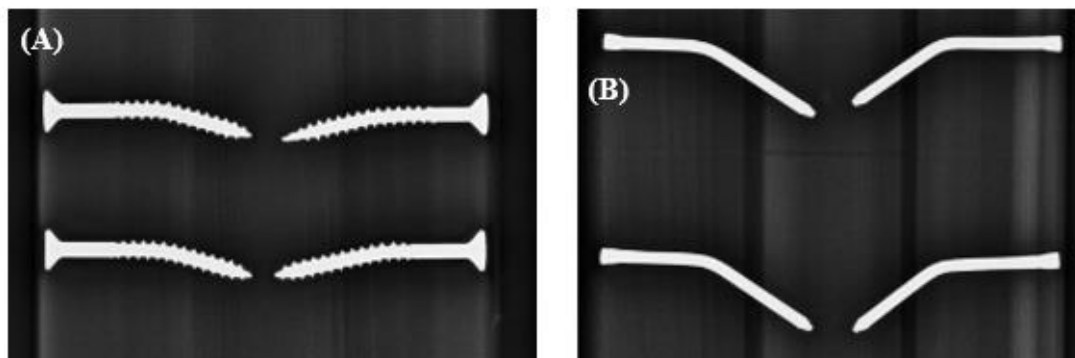


Fonte: Da autora (2020).

(A) Tratamento Cola e Prego. (B) Tratamento Cola e Prego Imediatamente. (C) Tratamento Cola e Parafuso Imediatamente.

Nos tratamentos Pregos (P) e Parafuso (PF), os elementos metálicos apresentaram o modo de falha II de acordo com a teoria de Johansen, exibindo a formação de apenas uma rótula plástica (Figura 25 – A e B). A ausência de adesivo garantiu um comportamento dúctil, permitindo maiores deformações nos elementos metálicos. Observa-se semelhança com o comportamento dos pinos metálicos que ensaiados isoladamente com os analisados por Nouri et al. (2019). Contudo, esses autores investigaram comportamento de pinos metálicos em ensaio *push-out*, conectados em três tipos diferentes de vigas (LVL, Glulam madeira macia/madeira dura) e encontraram nos modos de falha a formação de uma rótula plástica. Embora os materiais sejam diferentes dos que foram utilizados neste trabalho é possível perceber o comportamento dúctil dos elementos metálicos quando submetidos a ensaio *push-out*.

Figura 25: Imagens de raios X do comportamento dos pinos metálicos



Fonte: Da autora (2020).

(A) Tratamento Parafuso. (B) Tratamento Pregos

6 CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo permitiram concluir:

- 1) O elemento cola, utilizado separadamente garante maior resistência ao cisalhamento em estruturas de madeira submetidas ao ensaio *push-out*, apresentando um comportamento mais rígido e poucas deformações.
- 2) A aplicação de cola entre as partes emendadas por pregos e parafusos, não aumenta a resistência do elemento estrutural, pelo contrário, reduz.
- 3) A resistência dos elementos que foram colados e posteriormente pregados é maior do que os que foram colados e pregados imediatamente, entretanto ainda é menor que a resistência do elemento que foi apenas colado.
- 4) Os pinos metálicos dos tratamentos que receberam cola não apresentaram deformação, a falha do elemento ocorreu na linha de cola. Enquanto que, os tratamentos que receberam apenas pregos ou parafusos, os pinos exibiram um modo de deformação classificado como tipo II segundo a teoria de Johansen, com a formação de uma rótula plástica.

7 REFERÊNCIAS

ABNT. Projeto de Estruturas de Madeira. NBR 7190, Rio de Janeiro, 1997.

ALMEIDA, D. H. Análise das resistências de embutimento e compressão para madeiras de Pinus e Eucalipto. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Itapeva, 2011.

ALMEIDA, D. H. et al. Embedment strength of Pinus sp. wood to metal pins. *Advanced Materials Research*, v. 884-885, p. 653-656, 2014.

ALMEIDA, F. A. L. A madeira como material estrutural– projeto da estrutura da cobertura de um edifício Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) a Mestrado Integrado em Engenharia Civil –Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI). Artigo técnico nº 7. Curitiba, 2003. 6p.

BIANCHE, J. J., et al. Shear strength in the glue line of *Eucalyptus* sp. and *Pinus* sp.wood. *Rev. Árvore* vol.40 no.6 Viçosa Nov./Dec. 2016.

BRANCO, J., CRUZ, P., PIAZZA, M. (2006). Asnas de madeira. A importância da rigidez das ligações. 4as Jornadas de Engenharia de Estruturas (LNEC), 13 a 16 de Dezembro de 2006, Lisboa, LNEC, Lisboa.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A R.; DIAS, A. A. Dimensionamento de elementos estruturais de madeira. Barueri: Manole, 2003.

CALIL NETO, C. Ligações com parafusos auto-atarraxantes sem pré-furação para uso em estruturas de madeira. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CARNEIRO, R.P. Colagem de junta de madeira com adesivo epóxi. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

CESAR, A. A. S. Estudo da interação adesivo-paro cula em painéis OSB (oriented strand board). 2011. 88p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2011.

CHYBIŃSKI, M. POLUS, Ł. 2019. Theoretical, experimental and numerical study of aluminium-timber composite beams with screwed connections. *Construction and Building Materials*, 226, 317–330.

COWLING E. B, HORSFALL, J. G.. *Plant disease: an advanced treatise: how disease develops in populations*, Academic Press Inc., New York (1978), pp. 361-382

DERIKVAND, M. Short-term and long-term bending properties of nail-laminated timber constructed of fast-grown plantation eucalypt. *Construction and Building Materials* 211 952–964; 2019.

DIETSCH P, BRANDNER R .Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements – a state-of-the-art report. *Constr Build Mater*;97:78–89; 2015

DUARTE, R.S. Avaliação do comportamento de ligações com parafusos auto-atarraxantes em vigas de MLC. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004

EN 26891. Timber structures – joints made with mechanical fasteners – general principles for the determination of strength and deformation characteristics, ISO 6891-1983 (E); 1991.

FARIA, A., NEGRÃO, J. (2009). *Projecto de Estruturas de Madeira*. Publindústria, Edições Técnicas, Porto.

FOLLRICH, J.; VAY, O.; VEIGEL, S.; MÜLLER, U. Bond strength of end-grain joints and its dependence on surface roughness and adhesive spread. The Japan Wood Research Society. 2010.

FRIHART, C. R., HUNT, C. G. Adhesives with Wood Materials Bond Formation and Performance. In: Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010, 508 p. cap. 10.

HASSANIEH, A et al. Experimental and analytical behaviour of steel-timber composite connections. Construction and Building Materials. Volume 118, 15 August 2016, Pages 63-75.

IWAKIRI, S. Painéis de madeira reconstruída. 2. ed. Curitiba: FUPEF, 2005. 254p

JAGELS R. Management of wood properties in planted forests a paradigm for global forest production. Technical report, UN Forestry Department; 2006.

JUNIOR, J. S. Avaliação experimental da resistência de ligações em corte duplo em madeira com parafusos passantes - Trabalho de Conclusão de Curso Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2017.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E.; STAM, A.J. Principles of wood science and technology. Berlin: Springer-Verlag, 1975. v. 2. 703 p.

KOZERSKI, C. E. Análise comparativa de ligação com pinos metálicos, pregos e parafusos em estruturas de madeira. Monografia (Especialização em Projeto de Estruturas) - Programa de Pós-Graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2012.

MADSEN, B. Reliable timber connections. Progress in Structural Engineering and Materials, 1998 Vol I (3), 245-252, Construction Research Communications Limited, Peterborough (Reino Unido).

MAIA, B. B. Resistência de ligações pregadas em madeira. Monografia - Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campo Mourão, 2016.

MANERA, R. S. Ponte com estrutura aportçada de madeira roliça. Dissertação DE Mestrado - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2011.

MARRA, G. G. Technology of wood bonding: principles in practice. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 454 p.

MEGHLAT, E. M. et al. A new approach to model nailed and screwed timber joints using the finite element method. *Construction and Building Materials* 41 263–269, 2013.

MENDES, P. (1994). Ligações em estruturas de madeira: tecnologia e dimensionamento de acordo com o Eurocódigo 5. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

NOURI F, et al. Experimental study of timber–timber composite members. Centre for Infrastructure Engineering and Safety, School of Civil and Environmental Engineering, UNSW Sydney, Australia. *High Performance and Optimum Design of Structures and Materials III*, 2019.

OLIVEIRA, M. A. M; DIAS, A. A. Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 7, n. 26, p. 33-64, 2005

PAULA FILHO, J. H. M. Numerical modeling of traditional timber connections. *Advanced Masters in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions*. University of Minho. July, 2014

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle, *Estruturas de Madeira*, LTC, 6ª Edição, Rio de Janeiro, 2003.

PINTO, J.A. Análise da viabilidade do uso da madeira de *Cryptomeria japonica* para laminação e produção de painéis compensado. 2011. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011

PIZZI, A. Wood adhesives: Chemistry and Technology. New York: Marcel Dekker, 1983. 364 p.

PORTEOUS, J., KERMANI, A. Structural timber design to Eurocode 5. Blackwell Publishing Ltd, Oxford - Reino Unido - 2007.

RAMAGE ,M.H. Et Al. The wood from the trees: The use of timber in construction . Renewable and Sustainable Energy Reviews 68 333–359; 2017.

RAMMER, D, R. 2010. Fastenings. *Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 8*. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory p. 4.1-4.19., 190, 4-1.

RAMMER, D, R. 2016. Wood: Mechanical Fasteners. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering

RIGGIO, M., SANDAK, J., & SANDAK, A. Densified wooden nails for new timber assemblies and restoration works: A pilot research. *Construction and Building Materials*, 102, 1084–1092; 2016.

SCHIRO, G. Et Al. Testing of timber-to-timber screw-connections in hybrid configurations. *Construction and Building Materials* 171 (2018) 170–186

SELBO, M. L. Adhesives bonding of wood. Was., DC. FPL – FS – USDA, Technical Bulletin, n. 1512, aug. 1975.

SMITH, Ian; FOLIENSTE, Greg. Load and Resistance Factor Design of Timber Joints: International Practice and Future Direction. *Journal of Structural Engineering*, Jan. 2002, p. 48-59.

SOBRAL FILHO, M. Adesão e adesivos para madeira: teorias de adesão e a natureza das colagens com madeira. Brasília: Ministério da Agricultura, 1982. 22 p. (Série Técnica, 5)

SOLTIS, Lawrence A.; WILKINSON, Thomas L. Chapter 1: Introduction. Chapter 4: Bolts, drift bolts, and pins. In: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 84. Mechanical Connections in Wood Structures, New York, 1997.

TANNERT T, LAM F. Self-tapping screws as reinforcement for rounded dovetail connections. *Progr. Struct Eng Mater, Struct Control Health Monitor* 2009;16 (3):374–84.

TIMBER ENGINEERING STEP 1. Basis of design, material properties, structural components and joints. Holanda: Centrum Hout. 1995

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

WALSH-KORB, Z, AVÉROUS, L. Recent developments in the conservation of materials properties of historical wood. *Progress in Materials Science*. Volume 102, Pages 167-221, May 2019.