

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANA JULIA ZUNTA CARNIEL

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO PRESERVATIVO EM *EUCALYPTUS*  
*UROGRANDIS* NA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES PREGADAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO  
2017

ANA JULIA ZUNTA CARNIEL

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO PRESERVATIVO EM *EUCALYPTUS*  
*UROGRANDIS* NA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES PREGADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris

TOLEDO

2017



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná



Câmpus Toledo  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil

---

---

### TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 81

## **INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO PRESERVATIVO EM EUCALYPTUS UROGRANDIS NA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES PREGADAS**

por

**Ana Julia Zunta Carniel**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 9:10 h do dia **09 de Novembro de 2017** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos membros abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

---

Eng. Ftal. MSc. André Ricardo Angonese

---

Eng. Ftal. MSc. Renan Zunta Raia

---

Prof Dr. Gustavo Savaris  
(UTFPR – TD)  
Orientador

---

Visto da Coordenação  
Prof. Dr. Fúlvio Naterci Feiber  
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Aos meus pais, Meire e Luiz, meu irmão Luiz Eduardo e a todos os meus familiares e amigos que de alguma forma fizeram com que essa conquista fosse possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre ao meu lado, me guiando e iluminando. Sem Ele, nenhuma das minhas conquistas e realizações seriam possíveis.

Agradeço aos meus pais, Luiz e Meire, e ao meu irmão Luiz Eduardo, por todo o incentivo, apoio, ajuda, paciência, por cada ligação atendida no meio da noite, e por comemorarem e se alegrarem comigo diante da aprovação em cada disciplina. Obrigada por serem tão especiais, por se dedicarem tanto a mim e por fazerem tudo para sempre me verem feliz e realizada. Vocês são meus exemplos de vida, caráter e profissionalismo!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gustavo Savaris, por toda a dedicação, paciência e disponibilidade para me orientar. Sem o seu conhecimento passado para seus alunos e sem a sua incansável ajuda, esse trabalho não teria mérito.

Aos demais professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Toledo, por todos os ensinamentos passados de maneira magnífica a mim e aos meus colegas. Todo o conhecimento repassado por vocês fará de nós profissionais qualificados e diferenciados.

Aos meus amigos da faculdade, que estavam sempre dispostos a ajudar, fazer companhia, dar conselhos, estudar em grupo, tirar dúvidas, dar risadas e se divertir. Vocês tornaram a presente fase da minha vida ainda mais divertida, única e especial. Com certeza cada um de vocês, com seu jeito particular de ser, vai deixar muita saudade!

A minha família e amigos de modo geral, pois todos estavam sempre dispostos a se envolver com meus estudos, ajudando da maneira que era possível a cada um. A preocupação de todos com o meu futuro e sucesso, com certeza, foi reconhecida.

Agradeço ainda a UNIOESTE, FAG e UNIPAR, por gentilmente cederem seus laboratórios para que fosse possível a realização dos ensaios necessários para o meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Por fim, agradeço a banca examinadora pela disponibilidade e competência. Com certeza o conhecimento de vocês agregou para que o trabalho fosse realizado com mais qualidade.

## RESUMO

CARNIEL, Ana Julia Zunta. **Influência do tratamento preservativo em *Eucalyptus urograndis* na resistência de ligações pregadas**. 77f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2017.

A utilização da madeira na construção civil vem aumentando conjuntamente ao aumento dos estudos relacionados ao melhoramento e desenvolvimento do material, podendo citar o tratamento preservativo. Considerando que em estruturas de madeira, a ligação é o ponto mais frágil, faz-se necessário aprofundar-se também em pesquisas nessa área. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência do tratamento preservativo da madeira de *Eucalyptus urograndis* por autoclavagem com CCA na resistência de ligações com oito pregos à corte simples. Foram realizados ensaios de umidade, densidade aparente, resistência à compressão paralela às fibras e retratibilidade, para cada estado da madeira, a fim de caracterizá-los. Além disso, realizou-se ensaio de resistência da ligação pregada em corpos de prova de madeira natural e tratada, com seção principal de 5cm x 5cm e seção secundária de 5 cm x 2,5 cm, ambas com comprimento de 25cm. Os resultados das resistências experimentais das ligações foram comparados, também, com as resistências calculadas através das normas NBR 7190 (ABNT, 1997), EUROCODE 5 (CEN, 2004) e NDS (AWC, 2015). Comparando a resistência à compressão paralela às fibras, a madeira tratada apresentou melhores resultados, por outro lado, comparando a densidade aparente, a madeira natural apresentou um valor maior. Para a retratibilidade, o tratamento preservativo não influenciou nos resultados, uma vez que foram iguais para a madeira natural e tratada. Analisando as resistências experimentais, a madeira natural apresentou maior resistência final. Porém, para o deslocamento até 10mm, a madeira tratada obteve melhores resultados, uma vez que os deslocamentos foram nitidamente menores para a mesma carga aplicada em comparação a madeira natural. Em relação aos modelos teóricos de documentos normativos, apesar de todos os resultados analíticos garantirem a segurança da estrutura, os baseados na EUROCODE 5 (CEN, 2004) foram os que mais se aproximaram dos valores experimentais. O modelo brasileiro foi o único que apresentou valores calculados maiores para a madeira tratada, diferentes dos resultados máximos experimentais. Dessa forma, conclui-se que o tratamento preservativo pode ter influência positiva, negativa ou nula, dependendo da propriedade analisada. Em relação a resistência da ligação, conclui-se que a utilização de peças submetidas a tratamento em estruturas de madeira garantem maior conforto e segurança aos usuários. E por fim, a conclusão referente aos resultados analíticos é a de que a EUROCODE 5 (CEN, 2004) mais se aproxima dos resultados experimentais, apesar de todas as normas resultarem em valores abaixo do encontrado na prática.

Palavra-chave: Resistência da ligação. Ligação pregada. *Eucalytus urograndis*. Madeira tratada. Propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

CARNIEL, Ana Julia Zunta. **Influence of the preservative treatment in *Eucalyptus urograndis* on resistance of nailed connections.** 77f. Undergraduate Thesis – Civil Engineering – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2017.

The use of wood in civil construction has been increasing together with the increase in studies related to the improvement and development of the material, including preservative treatment. Considering that in wood structures, the connection is the most fragile point, it is necessary to deepen also in researches in this area. Thus, the present work has the objective of analyzing the influence of the preservative treatment of the wood of *Eucalyptus urograndis* by autoclaving with CCA in the resistance of connections with eight nails to the simple cut. Tests of moisture, apparent density, compressive strength parallel to the fibers and retratibility were carried out for each state of the wood in order to characterize them. In addition, the bond strength test was performed on natural and treated wood specimens, with a 5 cm x 5 cm main section and a 5 cm x 2.5 cm secondary section, both with a length of 25 cm. The results of the experimental resistance of the connections were also compared with the resistances calculated through the standards NBR 7190 (ABNT, 1997), EUROCODE 5 (CEN, 2004) and NDS (AWC, 2015). Comparing the compressive strength parallel to the fibers, the treated wood presented better results, on the other hand, comparing the apparent density, the natural wood presented a higher value. For shrinkability, the preservative treatment did not influence the results, since they were the same for the wood with and without treatment. Analyzing the experimental resistances, the untreated wood presented greater final resistance. However, for the displacement up to 10mm, treated wood obtained better results, since the displacements were clearly smaller for the same applied load compared to natural wood. Regarding the theoretical models of normative documents, although all the analytical results guaranteed the safety of the structure, those based on EUROCODE 5 (CEN, 2004) were the closest to the experimental values. The Brazilian model was the only one that presented higher calculated values for the treated wood, different from the maximum experimental results. Thus, it is concluded that the preservative treatment can have positive, negative or zero influence, depending on the property analyzed. Regarding the bond strength, it is concluded that the use of treated parts in wooden structures guarantees greater comfort and safety to users. Finally, the conclusion regarding the analytical results is that EUROCODE 5 (CEN, 2004) is closer to the experimental results, even though all the standards result in smaller values than those found in practice.

Keywords: Resistance of connections. Nailed connections. *Eucalyptus urograndis*. Treated wood. Mechanical properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da cadeia produtiva da madeira de reflorestamento. ....	19
Figura 2 – Processo de tratamento em autoclave. ....	23
Figura 3 – Concentração de tensões na região da ligação. ....	25
Figura 4 – Espaçamentos entre pregos em corpo de prova: (a) comprimido (b) tracionado.....	28
Figura 5 – Demonstração das espessuras do corpo de prova. ....	31
Figura 6 - Modos de ruptura da ligação para uma seção de corte. ....	32
Figura 7 – Modo de Ruptura da Ligação ( $I_s$ e $I_m$ )......	34
Figura 8 - Modo de Ruptura da Ligação ( $II$ e $III_m$ )......	35
Figura 9 - Modo de Ruptura da Ligação ( $III_s$ e $IV$ )......	35
Figura 10 – Diâmetro real do prego.....	39
Figura 11 – Dimensões corpo de prova para determinação da umidade (cm)......	40
Figura 12 – Dimensões corpo de prova para determinação da resistência a compressão paralela às fibras (cm). ....	40
Figura 13 – Dimensões dos corpos de prova, em mm. ....	44
Figura 14 – Instrumentação dos corpos de prova. ....	45
Figura 15 – Corpo de prova 6 tratado e 8 natural após ensaio de compressão paralela às fibras. ....	49
Figura 16 - Deslocamento após ensaio de resistência da ligação entre corpos de prova com madeira natural (a) e tratada (b). ....	60
Figura 17 – Ruptura por flexão no pino no corpo de prova com madeira natural (a) e tratada (b), respectivamente.....	61
Figura 18 - Resultados experimentais e estimativas de resistência da ligação pregada. ....	66



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentual de Contribuição para o Efeito Corda.....	34
Tabela 2 – Fator de Redução para $0.25'' \leq D \leq 1''$ .....	37
Tabela 3 – Resultados do Ensaio de Umidade. ....	47
Tabela 4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras. ..	48
Tabela 5 – Resultado do ensaio de Densidade Aparente. ....	50
Tabela 6 - Resultados do ensaio de retração e inchamento para madeira no estado natural. ....	52
Tabela 7 – Resultados do ensaio de retração e inchamento para madeira tratada. .	53
Tabela 8 - Resultados análise estatística para os resultados de retração, inchamento, variação volumétrica e coeficiente anisotrópico entre madeira natural e tratada. ....	55
Tabela 9 – Resultados do ensaio de umidade e resistência da ligação para corpos de prova com madeira natural.....	57
Tabela 10 – Resultados do ensaio de umidade e resistência da ligação para corpos de prova com madeira tratada.....	58
Tabela 11 – Resistências da ligação para o deslocamento de 10mm em corpos de prova de madeira natural e tratada. ....	59
Tabela 12 – Carga de ruptura da ligação entre corpos de prova naturais e trados...	62
Tabela 13 – Propriedades da madeira. ....	63
Tabela 14 - Propriedades do prego.....	63
Tabela 15 – Estimativa da resistência da ligação segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997). ....	63
Tabela 16 – Estimativa da resistência da ligação segundo EURODOE 5 (CEN, 2004). ....	64
Tabela 17 – Caracterização da madeira para cálculos referentes à NDS (AWC, 2015). ....	64
Tabela 18 – Coeficientes para NDS (AWC, 2015). ....	65
Tabela 19 – Estimativa da resistência da ligação segundo a NDS (AWC, 2015).....	65
Tabela 20 – Resultados experimentais e estimativas de resistência da ligação pregada. ....	66

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AS – *Allowable Sress*

AWC – *American Wood Council*

CA – Coeficiente de Anisotropia

CCA – Arseniato de Cobre Cromatado

CCB – Borato de Cobre Cromado

CP – Corpo de Prova

CEN – *European Committee For Standardization*

FAG – Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz

ELS – Estado Limite de Serviço

ELU – Estado Limite Último

LRFD – *Load Resistance Factor Design*

NBR – Norma Brasileira

NDS – *National Design Specification*

UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

UNIPAR – Universidade Paranaense

## LISTA DE SIMBOLOS

$d$  – diâmetro do prego

$d_0$  – diâmetro de pré-furação

$\beta$  – relação entre espessura e diâmetro do prego para a NBR 7190 (ABNT, 1997) e razão entre as resistências de embutimento das peças de madeira pela EUROCODE 5 (CEN, 2004)

$t$  – espessura da peça de madeira para NBR 7190 (ABNT, 1997) e EUROCODE 5 (CEN, 2004)

$\beta_{lim}$  – parâmetro comparativo da NBR 7190 (ABNT, 1997)

$f_{yd}$  – tensão de escoamento do aço do prego pela NBR 7190 (ABNT, 1997)

$f_{ed}$  – resistência ao embutimento da madeira pela NBR 7190 (ABNT, 1997)

$R_{vd,1}$  – resistência teórica da ligação para um prego pela NBR 7190 (ABNT, 1997)

$R_{vd,n}$  – resistência teórica da ligação para n pregos

$f_{h,0,k}$  – resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira pela EUROCODE 5 (CEN, 2004)

$\rho_k$  – densidade aparente característica pela EUROCODE 5 (CEN, 2004)

$f_{v,Rk}$  – resistência teórica da ligação para um prego pela EUROCODE 5 (CEN, 2004)

$M_{y,Rk}$  – momento de escoamento do pino

$f_{u,k}$  – resistência última à tração do aço

$f_{ax,Rk}$  – resistência ao arrancamento do pino

$Z$  - resistência teórica da ligação para um prego pela NDS (AWC, 2015)

$F_{yb}$  – resistência ao escoamento do aço do prego pela NDS (AWC, 2015)

$R_d$  – fator de redução

$R_e$  – relação entre as resistências de embutimento das peças de madeira pela NDS (AWC, 2015)

$R_t$  – relação entre as espessuras das peças

$l$  – espessura da peça de madeira pela NDS (AWC, 2015)

$F_e$  – resistência ao embutimento da peça pela NDS (AWC, 2015)

$\theta$  – ângulo máximo entre a direção da carga e a direção do pino

$G$  – relação entre a massa específica da madeira e a da água

$m_i$  – massa úmida

$m_s$  – massa seca

$U$  – teor de umidade

$f_{c0}$  – resistência à compressão paralela às fibras

$F_{c0,máx}$  – força máxima na compressão paralela às fibras

$A$  – área da seção

$\rho_{ap}$  – densidade aparente pela NBR 7190 (ABNT, 1997)

$m_{12\%}$  - massa do corpo de prova a 12% de umidade

$v_{12\%}$  - volume do corpo de prova a 12% de umidade

$k$  – coeficiente volumétrico para mudança de 1% de umidade

$\rho_u$  – densidade aparente com teor de umidade de U%

$\varepsilon_{r,i}$  – deformação específica de retração na direção i

$\varepsilon_{i,i}$  – deformação específica de inchamento na direção i

$L_{i,sat}$  – dimensão da direção i do corpo de prova saturado

$L_{i,seca}$  – dimensão da direção i do corpo de prova seco

$\Delta V$  – variação volumétrica

$V_{sat}$  – volume do corpo de prova saturado

$V_{seca}$  – volume do corpo de prova seco

$f_{12}$  – resistência da ligação corrigida para teor de umidade de 12%

$f_{u\%}$  – resistência da ligação com madeira a u% de umidade

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	15
1.2 OBJETIVO GERAL .....	15
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
1.4 DELIMITAÇÕES.....	16
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
2.1 A MADEIRA NA CONSTRUÇÃO .....	17
2.2 MADEIRA DE REFLORESTAMENTO .....	18
2.2.1 <i>Eucalyptus</i> .....	20
2.3 TRATAMENTO PARA PRESERVAÇÃO DA MADEIRA.....	21
2.3.1 Impregnação Por Pressão - Autoclave .....	22
2.3.2 Preservação x Propriedades mecânicas .....	24
2.4 LIGAÇÕES POR PINOS METÁLICOS.....	25
2.4.1 Ligações Pregadas.....	26
2.4.2 Trabalhos Técnico-científicos Realizados Sobre Ligações Por Pinos Metálicos .....	28
2.5 CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO TEÓRICA DA RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES .....	30
2.5.1 NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira (ABNT, 1997).....	30
2.5.2 EUROCODE 5 (CEN, 2004) - <i>Design of Timber Structures</i> .....	32
2.5.3 NDS (AWC, 2015) – “ <i>National Design Specification for Wood Construction</i> ” ...	34
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
3.1 MADEIRA UTILIZADA.....	38
3.2 PREGOS .....	38
3.3 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA .....	39
3.3.1 Ensaio de Umidade .....	39

3.3.2 Resistência à Compressão Paralela às Fibras.....	40
3.3.3 Densidade Aparente.....	41
3.3.4 Retratibilidade .....	42
3.4 CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE LIGAÇÃO .....	43
3.5 PROCEDIMENTO DE ENSAIO.....	44
3.6 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA TEÓRICA DAS LIGAÇÕES .....	46
3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	46
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>47</b>
4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA .....	47
4.1.1 Ensaio de Umidade .....	47
4.1.2 Resistência à Compressão Paralela às Fibras.....	47
4.1.3 Densidade Aparente.....	49
4.1.4 Retratibilidade .....	51
4.2 RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO PREGADA .....	56
4.2.1 Madeira Natural.....	56
4.2.2 Madeira Tratada .....	57
4.2.3 Comparação Entre Ligações com Madeira Natural e Tratada.....	58
4.3.4 Comparação com Estimativas da Norma .....	62
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>69</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	70
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Por ser um material natural e considerando que a sua utilização apresenta muitas vantagens ao meio ambiente quando comparado a diversos outros, nos últimos anos, a utilização da madeira vem aumentando em diversos setores, principalmente na construção civil. Exemplos claros dessa expansão estão na utilização de madeira em estruturas de coberturas e até mesmo em edifícios construídos com a predominância desse material.

Para acompanhar o avanço da indústria madeireira e do seu emprego, primeiramente se fez necessário o investimento no reflorestamento de espécies de rápido crescimento, como por exemplo, *Eucalyptus* e *Pinus*. Com a escassez da madeira nativa e os diversos incentivos para a preservação desta matéria-prima, a utilização do novo processo de produção da madeira se tornou predominante.

Diante desse novo panorama, os estudos em relação às plantações de árvores avançaram. Prova disso é a existência de híbridos que são formados pelo cruzamento de espécies distintas, obtendo-se, assim, o melhoramento de algumas características, como propriedades físicas e mecânicas.

Ademais, o estudo relacionado ao tratamento preservativo da madeira tem impulsionado a utilização desse material. Essa intervenção tem como objetivo melhorar a resistência da madeira às intempéries e aos ataques biológicos, aumentando assim a sua vida útil. Os estudos relacionados a essa área comprovam a eficácia das mais diversas técnicas, entre elas, o tratamento em autoclave utilizando compostos químicos que dependem da espécie da madeira.

Considerando que a utilização de madeira na construção civil necessita de peças com variados formatos e dimensões, faz-se necessário o uso de ligações que podem ser feitas através de pinos metálicos (parafusos e pregos), colas ou ainda por ligações de contato, sendo a primeira de maior destaque.

O dimensionamento de ligações por pinos metálicos devem ser baseados em normativas nacionais e internacionais, como a NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1997), EUROCODE 5 (European Committee for Standardization - CEN, 2004) e National Design Specification - NDS (American Wood Council - AWC, 2015), que respaldam e garantem a segurança de estruturas de madeira.

Ambas as normas levam em consideração para o dimensionamento de ligações com pregos as propriedades mecânicas da madeira e do aço. Dessa forma, demanda-se de estudos experimentais que avaliam o real comportamento da ligação em relação às características da madeira e do pino metálico.

Considerando as diversas variáveis intrínsecas às estruturas de madeira, este trabalho busca avaliar a influência do tratamento preservativo da madeira proveniente de *Eucalyptus urograndis* (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) na resistência da ligação por pinos metálicos (pregos).

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Pesquisas relacionadas à resistência de ligações em estruturas compostas por madeira tratada são escassas, principalmente quando comparados a números de estudos realizados com outros materiais comumente utilizados na construção civil, como o concreto e o aço.

Diante do aumento da utilização de estruturas compostas por madeira tratada quimicamente na indústria civil, é necessário o aprofundamento do conhecimento em relação à influência do tratamento da madeira nessas construções.

Ademais, a importância do foco de estudo na região da ligação com prego é fundamentada por esse ser o ponto mais frágil de uma estrutura de madeira.

### 1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência do tratamento da madeira (*Eucalyptus urograndis*) por autoclavagem na resistência de ligações pregadas.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Correlacionar as propriedades mecânicas da madeira tratada e não tratada.
- Avaliar experimentalmente a resistência da ligação pregada de madeira tratada comparativamente à madeira não tratada;



- Comparar os resultados experimentais com as estimativas das normas NBR 7190 (ABNT, 1997), EUROCODE 5 (CEN, 2004) e NDS (AWC, 2015).

#### 1.4 DELIMITAÇÕES

No presente trabalho serão analisados corpos de prova confeccionados com madeira do híbrido *Eucalyptus urograndis*, tratados em autoclave com Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), montados com oito pregos de 6,2mm de diâmetro e 138mm de comprimento, em corte simples.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 A MADEIRA NA CONSTRUÇÃO

A utilização da madeira como material na construção civil é fundamental, considerando seu emprego em acabamentos, como esquadrias, pisos, portas, forros; em produtos industrializados na construção de residências; em obras de grande porte, como pontes; e sua ampla comercialização para estruturas de coberturas residenciais e comerciais (CALIL NETO, 2014).

Sua aplicação como elemento estrutural tem se destacado nos últimos anos, atribuindo tal aumento à tecnologia empregada em seu beneficiamento, com a utilização de agentes preservantes de maior qualidade, e da utilização de espécies de reflorestamento, como o *Eucalyptus* e o *Pinus*. A busca por produtos e processos que reduzem o custo e melhoram a qualidade e o desenvolvimento dos sistemas construtivos e das habitações em geral, também são considerados fatores relevantes para o aumento do uso da madeira como estruturas (ALMEIDA, 2011; RECCO et al., 2014).

Quando comparado com outros materiais utilizados na construção civil, além da elevada resistência mecânica, a madeira possui a considerável vantagem de ser uma matéria-prima renovável com baixo consumo energético. Se manejadas corretamente, as florestas podem ser cultivadas por um longo período. Dessa forma, a floresta se torna autossustentável, reabastecendo a oferta de madeira para as gerações futuras (SILVA, 2008).

Considerando o ponto de vista ecológico, a madeira é um material biodegradável, e sua eliminação ou reciclagem não acarretam quaisquer problemas ambientais. Em contraposição, a madeira é naturalmente um material combustível, heterogêneo e anisotrópico, vulnerável aos agentes externos, podendo ter sua durabilidade alterada quando utilizada sem tratamento. Comercialmente, possui limitações no comprimento das peças utilizadas na construção civil, devido a sua extração de troncos de árvores (SILVA, 2008; CALIL NETO, 2014).

A árvore, como um organismo vivo, não possui condições para o aproveitamento efetivo na construção civil. Dessa forma, a madeira deve ser transformada, através de várias etapas, para posterior utilização.

A derrubada é a operação de deitar por terra a árvore, ou seja, retirá-la do meio natural em que se encontra. O corte transversal em toras, desramada e despontada, consiste na fase de torar. Já a ação de falquejar, constitui-se da conversão de tora em falca, ou seja, transformá-la em seção retangular com a retirada das peças curvas dos cantos. O último procedimento é o de serrar, o qual subdivide uma tora ou peça de madeira por cortes longitudinais ou em série, de acordo com as medidas necessárias (SILVA, 2008).

Apesar do crescente uso da madeira na construção civil e de ser economicamente viável, sua efetiva expansão só será dada com o estímulo ao desenvolvimento de novos produtos e processos, assim como com o desenvolvimento de novas normas e especificações que possibilitem a melhor adequação da madeira (CALIL NETO, 2014).

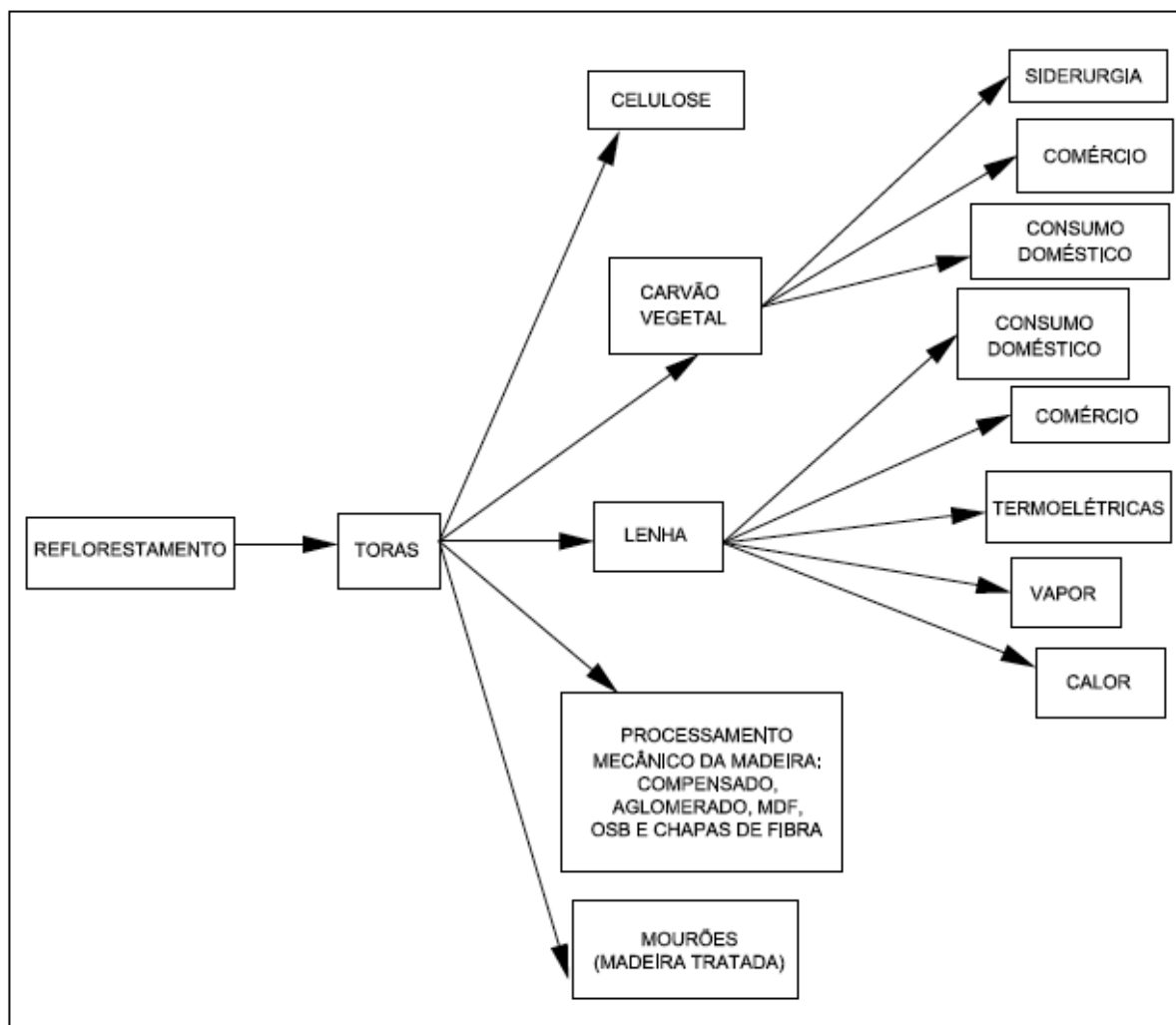
## 2.2 MADEIRA DE REFLORESTAMENTO

Visando suprir as variadas demandas de utilização da madeira e em virtude da escassez crescente da madeira nativa, visando a sua preservação, a madeira de reflorestamento vem ocupando um espaço cada vez maior no mercado (BRITO; CALIL JUNIOR, 2010, RECCO et al., 2014).

A inicial expansão do reflorestamento no Brasil se deu pelos incentivos fiscais que ocorreram no período de 1966 a 1986, motivando, assim, um novo ramo para a economia. Apesar do término do incentivo, o crescimento das áreas de florestas plantadas aumentou com o passar dos anos, sendo influenciados principalmente pelas empresas de papel e celulose e de siderúrgicas (BACHA, 2008).

Apesar de os projetos de reflorestamento possuir elevado risco técnico e econômico, considerando que os resultados são colhidos em longo prazo, podendo ocorrer doenças, ataques de pragas, incêndios e flutuações de mercado, a rentabilidade final é compensada pelo valor de comércio, visto a alta demanda atual (VALVERDE et al., 2004).

Entretanto, a utilização da madeira de reflorestamento se dissipa para muitos ramos da economia, sendo que para cada aplicação, há um processo de produção diferente, como visto no fluxograma da Figura 1.



**Figura 1 - Fluxograma da cadeia produtiva da madeira de reflorestamento.**  
**Fonte: SOARES, 2006.**

Dentro do setor da construção civil, a madeira de reflorestamento sofre preconceitos e enfrenta obstáculos que estão sendo superados com o passar dos anos, uma vez que essa não é considerada “nobre” como a madeira nativa. Apesar disso, a madeira tem um importante papel, pois como citado anteriormente, ela, como matéria-prima, apresenta um conjunto de características técnicas, econômicas e estéticas dificilmente encontradas em outro material (DEMARZO; PORTO, 2007).

Por ser proveniente de fontes renováveis, a utilização da madeira de reflorestamento contribui para a redução das concentrações dos gases causadores do efeito estufa, tornando-a um material ecológico e sustentável, e considerando ainda a possibilidade de reutilização ou reciclagem do material, ocorre uma redução dos resíduos sólidos produzidos na construção (DEMARZO; PORTO, 2007; DONADON, 2016).

Apesar das diversas espécies de madeiras plantadas encontradas no país, as que se destacaram no reflorestamento foram *Pinus* e *Eucalyptus*, devido ao rápido crescimento, boa qualidade da madeira e adaptabilidade ao clima e solo das regiões Sul e Sudeste, onde há a predominância de plantações (SOARES, 2006; DEMARZO; PORTO, 2007).

Segundo Calil Neto (2014), a plantação de *Eucalyptus* está atualmente em expansão, substituindo em muitos lugares a área plantada de *Pinus*, sendo esta, então, a principal espécie de madeira utilizada nos reflorestamentos.

### 2.2.1 *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* é composto por mais de 700 espécies, dentre as mais importantes estão *Eucalyptus saligna*, *E. grandis*, *E. urophylla* e seus híbridos, que são selecionados conforme necessidade do mercado (VITAL, 2007).

A atual expansão da área plantada de *Eucalyptus* é resultado de um conjunto de fatores: rápido crescimento, ciclo de curta rotação, alta produtividade, entre outros aspectos que favorecem o plantio em larga escala. Ademais, tem-se a influência dos aspectos biológicos, como o baixo teor de nutrientes nos tecidos, sistema radicular desenvolvido, capacidade de explorar solo em profundidade e a mobilização de nutrientes de camadas subsuperficiais para as superficiais, o que torna o gênero menos dependente das reservas nutricionais do solo, garantindo ampla adaptação aos ambientes de baixa fertilidade natural (CALIL NETO, 2014; BAZANI et al., 2014).

A madeira de *Eucalyptus* tratada, há décadas vem sendo utilizada na indústria de postes e moirões. Além disso, tem-se o grande potencial de uso em construções rurais, urbanas e industriais como currais, estacas de fundações, estruturas de contenção de terra, passarela, pontes, galpões rurais e industriais, edificações residenciais e comerciais, igrejas, brinquedos infantis, coberturas especiais, estruturas de arquibancadas, entre diversos outros (BRITO; CALIL JUNIOR, 2010).

Para Vital (2007), uma das espécies mais estudadas dentre as de plantio de florestas é o *Eucalyptus grandis*, o qual é amplamente utilizado no Brasil na produção de formas de concreto, carpintaria, estruturas de telhados, *pallets* e alguns

tipos de móveis. Através dessa espécie, devido ao cruzamento com outras espécies, há a possibilidade de formação de híbridos, como o *Eucalyptus urograndis*, formado por *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

### 2.3 TRATAMENTO PARA PRESERVAÇÃO DA MADEIRA

Por ser um material de origem orgânica, a madeira pode ser deteriorada por agentes biológicos e reações químicas, dependendo das condições ambientais a que for submetida, causando prejuízo aos usuários, e no caso da construção civil, trazendo riscos à segurança da obra. Dessa forma, faz-se necessário a utilização do tratamento químico para tornar a madeira um material durável e protegido contra deterioração (VIVIAN et al., 2012; CALIL NETO, 2014).

Segundo Hill (2006), o tratamento da madeira é a aplicação de um processo que altera as propriedades do material de modo que em toda a sua vida útil não ocorra perda nas melhorias do seu desempenho. Calil Junior (2006) também cita que:

Preservação de madeiras é o conjunto de medidas preventivas e curativas para controle de agentes biológicos (fungos e insetos xilófagos e perfuradores marinhos), físicos e químicos que afetam as propriedades da madeira, adotadas no desenvolvimento e na manutenção dos componentes de madeira no ambiente construído (CALIL JUNIOR, 2006).

A utilização e a escolha dos preservativos devem ser bem avaliadas de acordo com cada caso, a fim de se alcançar o resultado esperado. Independente do tipo de tratamento, a qualidade do mesmo depende de três requisitos indispensáveis: a) profundidade de penetração do produto preservativo, a partir da superfície da madeira; b) retenção, em termos de massa de produto por volume de madeira tratada; c) distribuição homogênea (MORESCHI, 2013; CALIL NETO, 2014).

A qualidade do tratamento depende de características intrínsecas a cada espécie, além de suas propriedades mecânicas. Lahtela et al. (2014) citam, por exemplo, que quanto maior for a densidade da madeira, mais facilmente será aumentada a sua resistência após o processo preservativo, sendo essa a propriedade mecânica comumente melhorada.

Para as madeiras do gênero *Eucalyptus*, o tratamento preservativo mais eficaz é através de métodos industriais, sob pressão, uma vez que apresentam maior controle da retenção e penetração do preservativo na madeira, considerando a baixa permeabilidade do material. Dessa forma, para a preservação do *Eucalyptus*, tem-se o tratamento de impregnação por pressão, que é realizado em autoclave (SILVA, 2008; VIVIAN et al., 2012).

### 2.3.1 Impregnação Por Pressão - Autoclave

O tratamento por impregnação sob pressão consiste em um método industrial, que se utiliza do autoclave (“vaso” hermeticamente fechado e robusto que resiste aos esforços de vácuo e pressão, acompanhado de bombas de vácuo e pressão) e de um produto preservador que é submetido a pressões que chegam a atingir 1,5 MPa (SILVA, 2008; MORESCHI, 2013).

Por ser um preservativo hidrossolúvel, fungicida e inseticida, com boa mobilidade na madeira, o produto químico utilizado para madeiras do gênero *Eucalyptus* é o Arseniato de Cobre Cromatado tipo C (CCA-C) (VIVIAN et al., 2012).

De acordo com Silva (2008), apesar da existência de diversos processos de impregnação por pressão, os mais comuns são o de “célula vazia” ou “Rueping” e o de “célula cheia” ou “Bethell”. O primeiro consiste em submeter a madeira a uma sobrepressão de ar inicial antes de se introduzir o preservador. Já na segunda, a madeira é sujeita a um período de vácuo inicial, antes de se introduzir o composto químico na autoclave.

Na Figura 2 são apresentadas as etapas do processo de tratamento em autoclave pelo método de “célula cheia”.

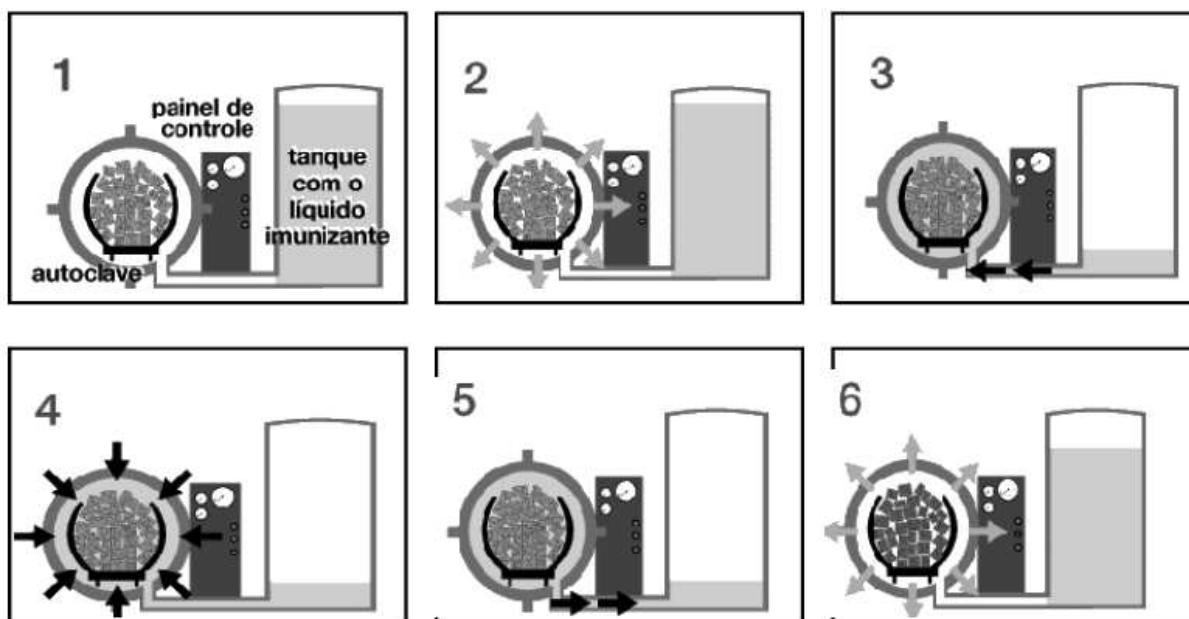


Figura 2 – Processo de tratamento em autoclave.  
Fonte: SILVA (2008).

A primeira etapa mostra o autoclave carregado com a madeira. Já na segunda, ocorre o vácuo inicial, que retira a maior parte do ar de dentro das células da madeira. Na terceira, o líquido imunizante (CCA) é transferido do tanque para o autoclave, sendo penetrado na célula da madeira sob pressão, conforme visto na quarta etapa. Na penúltima fase, o produto não absorvido é novamente transferido para o tanque. E por fim (etapa 6), ocorre o vácuo final, que retira o excesso de produto preservativo da superfície da madeira (SILVA, 2008).

Antes de ser introduzida no equipamento, a madeira deve ser seca ao ar livre até atingir uma umidade entre 12 e 15%, garantindo um teor de umidade a baixo do ponto de saturação das fibras. A secagem deve ser feita em temperatura ambiente, a fim de se evitar danos devido à retração ocasionada pela mudança bruta da própria umidade.

Sabendo dos objetivos dos tratamentos, a preservação química, nos parâmetros atuais, deve ser considerada um investimento indispensável e não, como anteriormente, um custo adicional, uma vez que proporciona à madeira condições de durabilidade para competir no mercado com os demais materiais de construção, gerando maior economia na utilização dos recursos florestais e incentivando a sua utilização (PINHEIRO, 2001).



### 2.3.2 Preservação x Propriedades mecânicas

São inúmeros os trabalhos realizados que analisam o tratamento preservativo da madeira com a sua durabilidade e resistência às intempéries, confirmando a sua relevância. Porém, dentro da construção civil além das propriedades químicas, as propriedades mecânicas possuem grande importância, uma vez que os cálculos para dimensionamento são baseados nelas.

Pinheiro (2001) realizou experimentos para verificar a influência da preservação química nas propriedades de resistência à compressão, resistência ao cisalhamento e módulo de elasticidade das espécies de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*. Com base nos resultados, o autor concluiu que, independente da classe, apesar de ocorrerem diferenças nos resultados para os dois estados da madeira, geralmente pequenos melhoramentos para a madeira tratada, estes não foram influenciados de maneira relevante devido à anisotropia do material.

Faria et al. (2015) através de seus experimentos avaliaram experimentalmente as principais propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* natural e tratada, concluindo que houve um aumento na resistência à compressão paralela às fibras da madeira da espécie citada submetida ao tratamento com CCA e consequente melhora nas propriedades para fins construtivos. Outra análise importante feita pelos mesmos autores foi a do coeficiente de anisotropia, uma vez que quanto maior esse coeficiente referente à relação entre contração tangencial e contração radial, maior é a instabilidade dimensional e a probabilidade de deformação, onde o resultado obtido, novamente, tendenciou para a madeira tratada (1,34) em relação à madeira não tratada (1,70).

Brocco et al. (2012) avaliaram a variação nas resistências à compressão paralela as fibras e à flexão estática em função do tempo (60, 90 e 120 min totais) e da pressão de tratamento (3, 5 e 6,5 kPa) em autoclave com CCB (borato de cobre cromado) para *Eucalyptus cloeziana*. Os autores concluíram que ambas as variáveis não influenciaram na resistência à compressão paralela, e igualmente na resistência e na rigidez à flexão. Tal resultado ocorreu, provavelmente, pela espécie produzir madeira densa, que foi capaz de suportar os efeitos de pressão aplicada sem que houvesse perda de sua resistência.

Vivian et al. (2012), analisaram a massa específica aparente de madeira tratada e não tratada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. Para a primeira

espécie sem tratamento, o resultado obtido foi de  $0,52 \text{ g/cm}^3$  e no estado tratado de  $0,53 \text{ g/cm}^3$ ; e para a segunda espécie os resultados foram de  $0,80 \text{ g/cm}^3$  e  $0,81 \text{ g/cm}^3$  para a madeira não tratada e tratada, respectivamente.

Os trabalhos apresentados analisaram a influência do tratamento preservativo na resistência, na elasticidade, no coeficiente de anisotropia, na massa específica aparente e nas variações dimensionais, sendo que em sua maioria, as propriedades foram melhoradas com o emprego do tratamento.

## 2.4 LIGAÇÕES POR PINOS METÁLICOS

Considerando o comprimento das peças de madeira serrada, as quais são frequentemente encontradas de 4 a 5 metros, para que seja viabilizado o uso estrutural desse material, é necessária a execução de ligações. Estas podem ser feitas por aderência ou penetração (CALIL JUNIOR, 1998).

As ligações por penetração são aquelas que utilizam elementos de ligação, como pinos e chapas metálicas, anéis, entre outros. Nessas estruturas, as forças que são transmitidas de uma peça para a outra geralmente convergem para uma pequena área (área do elemento de ligação), concentrando as tensões na região comprimida da parede do furo, conforme mostra a Figura 3. A distribuição de tensões é causada pela deformabilidade da madeira, dependendo, assim, das propriedades da madeira e do diâmetro do pino (CALIL JUNIOR, 1998; BAENA, 2015).

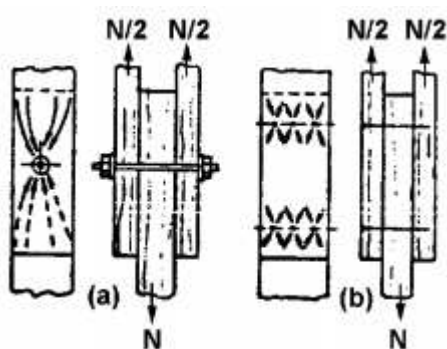


Figura 3 – Concentração de tensões na região da ligação.  
Fonte: CALIL JUNIOR (1998).

Conforme cita Baena (2015), o comportamento da ligação é determinado pela espessura da peça de madeira, diâmetro do pino, resistência ao embutimento da madeira e tensão limite de escoamento do pino. Através da análise do comportamento dos pinos metálicos, verifica-se que são capazes de suportar ligações com desempenhos elásticos (sem atingir a plastificação) e ainda atingir grandes deformações ocasionando deslocamentos significativos entre as peças da estrutura. Dessa forma, a força máxima resistida pela ligação ocorrerá pela flexão do pino (ou plastificação) ou pelo embutimento do pino na madeira, podendo ocorrer ainda por cisalhamento da madeira e fendilhamento.

Devido a concentração de tensões ocorrer exatamente nos pontos das ligações, tem-se a necessidade de estudar e calcular as regiões das ligações, consideradas as mais vulneráveis da estrutura (CALIL NETO, 2014).

As ligações por penetração que utilizam pinos metálicos são as mais difundidas dentro do setor da construção civil, e isso ocorre devido a algumas vantagens, tais como a grande variedade de modelos e bitolas, a não necessidade de mão-de-obra especializada, o baixo custo, fácil instalação e configuração das ligações, e constância nas propriedades mecânicas sob diversas condições ambientais de utilização (CALIL JUNIOR et al., 2003; BAENA, 2015).

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), as ligações por pinos metálicos podem ser constituídas por pregos ou parafusos.

A seguir serão detalhados os critérios de dimensionamento de ligações pregadas, objeto de estudo deste trabalho, necessários para a definição do programa experimental.

#### 2.4.1 Ligações Pregadas

Os primeiros modelos de pinos metálicos utilizados na construção civil foram os pregos, os quais sofreram grande evolução com o passar dos anos. Esse modelo de conector foi criado particularmente para resistir ao corte, porém, dependendo do modelo utilizado, possui significativa resistência ao arranque. Devido a grande deformabilidade provinda dos pequenos diâmetros, as ligações pregadas possuem também resistência as ações sísmicas, considerando que a ligação permite à zona da ligação um comportamento dúctil (CALIL NETO, 2014).

A NBR 7190 (ABNT, 1997) estipula que os pregos devem ser fabricados de aço 1011-B, e que as dimensões devem seguir os padrões estabelecidos na NBR 6627 (ABNT, 1981).

As ligações pregadas podem ser consideradas deformáveis ou rígidas, sendo que para a última classificação, devem ser utilizados quatro ou mais pregos, respeitando o diâmetro de pré-furação (NBR 7190,1997).

Para uma ligação ser considerada rígida, ela não deve possibilitar deslocamentos entre as peças da estrutura, ou seja, a ligação deve impedir o deslizamento entre os elementos, mantendo as seções planas na deformação. Em contrapartida, as ligações deformáveis são aquelas que permitem pequenos deslizamentos entre os componentes da estrutura (BRANCO; CRUZ, 2002; MIOTTO; DIAS, 2006).

Stamato (2002) cita que a rigidez das ligações deve ser considerada na análise local e global da estrutura, uma vez que a rigidez tem influência sob os deslocamentos e tensões internas da estrutura.

#### 2.4.1.1 Pré-Furação

De acordo com a norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997), o diâmetro de pré-furação ( $d_0$ ) depende exclusivamente do diâmetro dos pregos ( $d$ ) e do tipo de madeira, conforme apresentado nas Equações 1 e 2, para gminospermas e folhosas, respectivamente.

$$d_0 = 0,85d \quad (1)$$

$$d_0 = 0,98d \quad (2)$$

#### 2.4.1.2 Penetração do prego

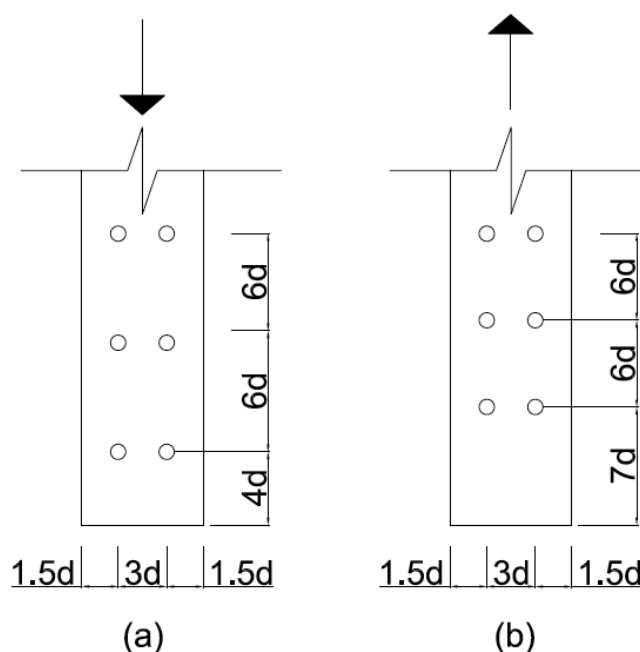
Para o prego ser considerado resistente, a penetração em qualquer uma das peças ligadas não deve ser menor que a espessura da peça mais delgada ou 12 vezes o diâmetro do pino (ABNT, 1997).

### 2.4.1.3 Espaçamento entre os pregos

De acordo com NBR 7190 (ABNT, 1997), quando o corpo de prova for submetido à compressão, o espaçamento entre dois pinos situados em uma mesma linha paralela à direção das fibras deve ser de seis vezes o diâmetro do prego. A norma prevê ainda que este deve ser quatro vezes o diâmetro do prego quando for referente à distância do centro do último prego a extremidade de peças comprimidas.

Já quando medido perpendicularmente às fibras, a distância paralela entre dois pinos deve ser de três vezes o diâmetro do prego e o afastamento de qualquer prego à borda lateral, de uma vez e meia o diâmetro.

A Figura 4 representa todos os espaçamentos citados para peças comprimidas (a) e ainda os normatizados para peças tracionadas (b).



**Figura 4 – Espaçamentos entre pregos em corpo de prova: (a) comprimido (b) tracionado.**  
**Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).**

### 2.4.2 Trabalhos Técnico-científicos Realizados Sobre Ligações Por Pinos Metálicos

Baena (2015) comparou os critérios de dimensionamento das ligações por pinos metálicos, especificadamente, por parafusos, em estruturas de madeira apresentadas pelas normas brasileira NBR 7190 (ABNT, 1982), europeia

EUROCODE 5 (CEN, 2004), americana LRFD (1996) e australiana AS (1994), para resistências a compressão paralela e normal às fibras da madeira e resistência ao embutimento, em madeiras das espécies *Pinus sp* e Cupiúba (*Goupia glabra*). Os valores de resistência calculados pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997) apresentaram resultados inferiores aos outros documentos normativos, para estruturas que apresentam pequenas relações entre a espessura da peça de madeira e o diâmetro do pino. Já experimentalmente, os resultados obtidos foram superiores aos valores teóricos da atual norma brasileira, se aproximando dos valores na norma europeia.

Silva et al. (2011) avaliaram o comportamento experimental de ligações pregadas com o aumento da temperatura, variando-a em 20, 50, 80, 100, 120, 150, 200 e 230°C. Os corpos de prova foram confeccionados com madeira da espécie *Pinus taeda* e pregos de 2,8mm de diâmetro e 54mm de comprimento, sendo analisadas ligações do tipo simples com 2, 4 e 6 pinos metálicos. Com os resultados, os autores concluíram que a umidade diminui linearmente com o aumento de temperatura até 150°C, alcançando teor de aproximadamente 0% nessa temperatura. Em relação à capacidade de carga, a conclusão foi de que a mesma diminui com o aumento da temperatura na faixa entre 80°C e 120°C; e ainda que à temperatura ambiente, essa resistência tem relação direta com o número de pinos, ou seja, aumenta proporcionalmente ao aumento de pregos.

Xavier et al. (2016) estudaram a influência da direção do carregamento (paralelo e perpendicular às fibras) e do teor de umidade na resistência da ligação pregada nas madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus paniculata*, e ainda compararam os resultados experimentais às resistências calculadas pela NBR 7190. A realização dos ensaios de compressão se deu seguindo a norma brasileira, com uma taxa de carregamento de 10 MPa/min. Com os resultados, os autores concluíram que o teor de umidade não influenciou na resistência da ligação para madeira de *Eucalyptus paniculata*, porém para as outras duas espécies as amostras úmidas apresentaram menores resistências. Outra conclusão foi a de que a direção de carregamento influencia na resistência, sendo que os melhores valores são obtidos na direção paralela.

Almeida et al. (2014) compararam os valores de resistência ao embutimento da madeira determinados experimentalmente e calculados pelas recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997). A madeira utilizada na confecção dos corpos de prova foi da espécie *Pinus taeda*. Para a montagem, foi utilizado um pino metálico de um

centímetro de diâmetro, e resistência de escoamento igual a 240 MPa em cada corpo de prova. Os resultados demonstraram a eficiência da norma brasileira no cálculo da resistência ao embutimento paralelo às fibras, porém não verificada para a direção normal às fibras. Segundo os mesmos, tal ineficiência se deu pelos valores do coeficiente dado em função do diâmetro do pino metálico ( $\alpha_e$ ) utilizados no cálculo, indicando a necessidade de novos estudos.

## 2.5 CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO TEÓRICA DA RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES

Neste tópico serão apresentados os critérios teóricos para o dimensionamento de ligação por pregos, baseando-se nas normas brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997), europeia EUROCODE 5 (CEN, 2004) e americana NDS (AWC, 2015).

### 2.5.1 NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira (ABNT, 1997)

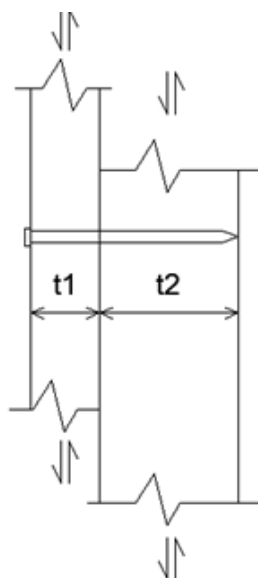
A resistência teórica das ligações através da norma brasileira considera a ruptura por embutimento da madeira ou flexão no pino.

Para ligações executadas com pregos sob cisalhamento, são avaliados dois coeficientes  $\beta$  e  $\beta_{lim}$ , dados pelas Equações 3 e 4 respectivamente, que determinam se a ruptura ocorre por esmagamento da madeira ou flexão do pino, respectivamente.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (3)$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad (4)$$

Onde,  $t$  é o menor valor entre a menor espessura dos elementos que compõem o corpo de prova ( $t_1$  e  $t_2$ ) ou a metade da maior espessura ( $t_2/2$ ), conforme visto na Figura 5; e  $d$  é o diâmetro do prego.



**Figura 5 – Demonstração das espessuras do corpo de prova.**  
**Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).**

O valor de  $f_{yd}$  é dado pela resistência de cálculo ao escoamento do aço utilizado no pino metálico, em MPa. Os valores de  $f_{ed}$  são referentes à resistência de cálculo de embutimento da madeira, em MPa, podendo ser considerado igual à resistência à compressão paralela às fibras.

Caso  $\beta \leq \beta_{lim}$ , ocorre o embutimento ou esmagamento da madeira, e a resistência de um plano de corte para cada parafuso ( $R_{vd,1}$ ) é dada pela Equação 5.

$$R_{vd,1} = 0,4 \frac{t^2}{\beta} f_{ed} \quad (5)$$

Se  $\beta > \beta_{lim}$ , ocorre a flexão do pino, e a resistência de um plano de corte para cada parafuso ( $R_{vd,1}$ ) é calculada através da Equação 6.

$$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd} \quad (6)$$

Na hipótese de o corpo de prova apresentar mais que um plano de corte, ou ainda, mais que um pino, a resistência  $R_{vd,1}$  é multiplicada pela quantidade de planos de corte e pregos, conforme a Equação 7, obtendo-se assim a resistência da ligação ( $R_{vd,n}$ ).



$$R_{vd,n} = n^{\circ} \text{ de planos de corte} * n^{\circ} \text{ de pregos} * R_{vd,1} \quad (7)$$

### 2.5.2 EUROCODE 5 (CEN, 2004) - Design of Timber Structures

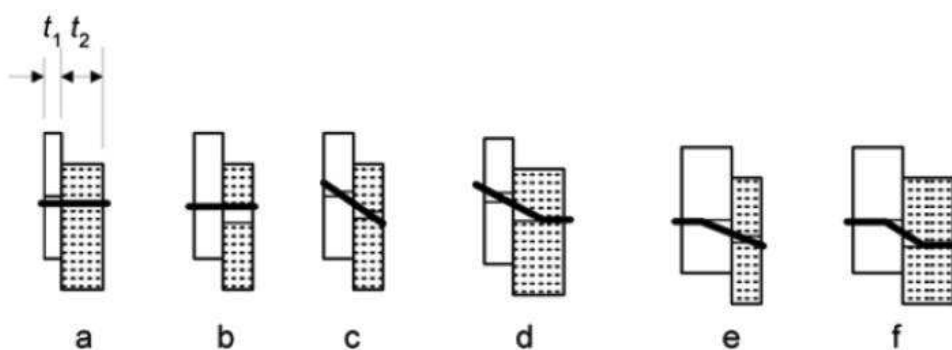
De acordo com a norma europeia EUROCODE 5 (CEN, 2004), o cálculo da resistência ao embutimento na direção paralela às fibras ( $f_{h,0,k}$ ), para pinos metálicos, é dado pela Equação 8.

$$f_{h,0,k} = 0,082 \times (1 - 0,01 \times d) \times \rho_k \quad (8)$$

Considera-se  $d$  o diâmetro do pino metálico, em mm, e  $\rho_k$  a densidade aparente característica, em  $\text{kg/m}^3$ .

Com o cálculo da resistência ao embutimento, pode-se estimar a resistência da ligação analisando a seção de corte.

Segundo o EUROCODE 5 (CEN, 2004), existem seis diferentes seções de análises de ruptura da ligação para seção simples utilizando pregos e parafusos, como mostra a Figura 6.



**Figura 6 - Modos de ruptura da ligação para uma seção de corte.**  
Fonte: EUROCODE 5:2004.

Analisando a Figura 6, nos modos de ruptura (a) e (b), a falha da ligação ocorre por embutimento do pino metálico somente em uma das peças da madeira. No modo de ruptura (c), verifica-se que o embutimento do pino metálico se dá, simultaneamente, nas duas peças de madeira. Já nos modos de ruptura (d) e (e), a falha da ligação é dada através da flexão do pino metálico apenas em uma das

peças de madeira. Ao contrário, no modo de ruptura (f) tem-se que a falha da ligação ocorre quando há flexão simultânea do pino metálico, nas duas peças de madeira.

Para cada caso apresentado, existe uma forma específica para o cálculo da resistência da ligação, sendo que a resistência de um prego em uma seção de corte ( $f_{v,Rk}$ ) será dada em N, pelo menor valor entre todas as relações apresentadas na Equação 9.

$$f_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \cdot \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{f_{ax,Rk}}{4} \quad (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{f_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + 2\beta} \cdot \left[ \sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{f_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{f_{ax,Rk}}{4} \quad (f) \end{array} \right. \quad (9)$$

Considera-se:

$t_1$  e  $t_2$  - espessura da madeira ou a penetração do pino nesta, em mm;

$f_{h,1,k}$  e  $f_{h,2,k}$  - valores característicos da resistência ao embutimento para espessura  $t_1$  e  $t_2$ , em MPa;

$\beta$  - razão entre  $f_{h,2,k}$  e  $f_{h,1,k}$ , adimensional;

$M_{y,Rk}$  - valor característico do momento de escoamento do pino, dado pela Equação 10.

$$M_{y,Rk} = 0,45 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (10)$$

Onde:

$f_{u,k}$  - é a resistência última a tração do aço.

$f_{ax,Rk}$  - resistência característica ao arrancamento do pino.

As relações (c), (d), (e) e (f) apresentadas na Equação 9 são divididas em dois termos. O primeiro está relacionado com a capacidade de carga, conforme a

Teoria de Rendimento de Johansen. Já o segundo ( $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$ ), se relaciona com a contribuição do efeito de corda, sendo limitado pelos percentuais observados na Tabela 1 de acordo com o tipo de conector.

<b>Tipo de conector</b>	<b>Percentual (%)</b>
Pregos redondos	15
Pregos quadrados e sulcados	25
Outros pregos	50
Parafusos autoatarraxantes	100
Outros parafusos	25
Buchas	0

Fonte: EUROCODE 5 (CEN, 2004).

Como o efeito de corda está diretamente ligado à resistência ao arrancamento, caso essa não seja conhecida, o segundo termo deve ser considerado nulo, como cita a norma europeia.

### 2.5.3 NDS (AWC, 2015) – “National Design Specification for Wood Construction”

A norma americana NDS (AWC, 2015) apresenta seis diferentes tipos de ruptura na ligação para corte simples.

A Figura 7 apresenta o modo de ruptura  $I_m$ , onde a peça esmagada é a peça secundária; e o modo  $I_s$ , no qual ocorre esmagamento local da peça principal.

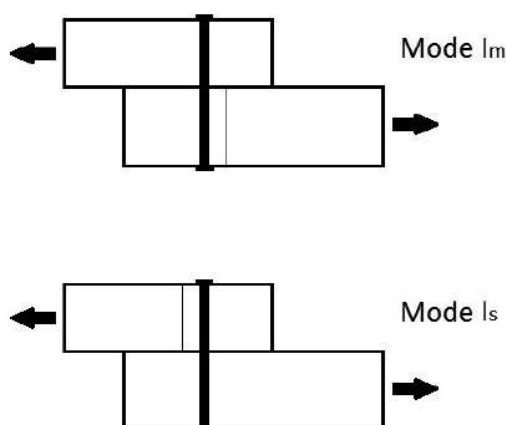
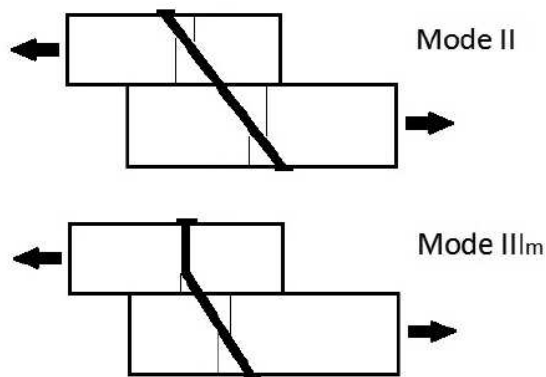


Figura 7 – Modo de Ruptura da Ligação ( $I_s$  e  $I_m$ )  
Fonte: NDS (AWC, 2015).

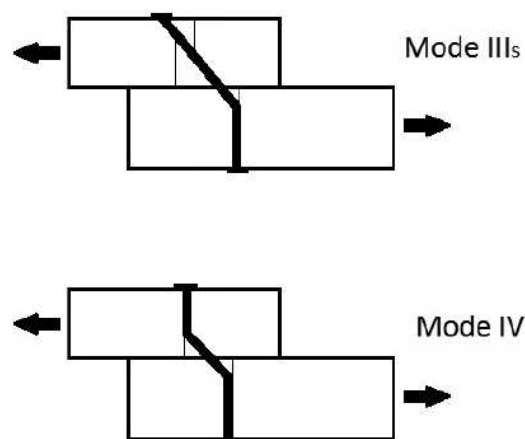
Como apresentado na Figura 8, o modo de ruptura II ocorre por esmagamento local das peças com rotação do pino. Analisando ainda a falha da

ligação no modo  $III_m$  tem-se o esmagamento da peça principal e formação de rótula plástica no pino.



**Figura 8 - Modo de Ruptura da Ligação (II e III<sub>m</sub>)**  
Fonte: NDS (AWC, 2015).

No modo  $III_s$ , mostrado na Figura 9, o esmagamento ocorre na peça secundária e, ainda, há formação de uma rótula plástica no pino por plano de corte. Por fim, o modo de ruptura IV ocorre por formação de duas rótulas plásticas por plano de corte com esmagamento de ambas as peças.



**Figura 9 - Modo de Ruptura da Ligação (III<sub>s</sub> e IV)**  
Fonte: NDS (AWC, 2015).

Para cada modo de ruptura, a norma NDS (AWC, 2015) determina uma resistência de ligação. Analisando esses valores, a resistência para um pino metálico, considerando plano de corte simples, será o menor valor entre os calculados através das relações presentes na Equação 11.

$$Z \leq \begin{cases} \frac{Dl_m F_{em}}{R_d} & (I_m) \\ \frac{Dl_s F_{es}}{R_d} & (I_s) \\ \frac{k_1 D l_s F_{es}}{R_d} & (II) \\ \frac{k_2 D l_m F_{em}}{(1 + 2R_e)R_d} & (III_m) \\ \frac{k_3 D l_s F_{em}}{(2 + R_e)R_d} & (III_s) \\ \frac{D^2}{R_d} \sqrt{\frac{2F_{em}F_{yb}}{3(1 + R_e)}} & (IV) \end{cases} \quad (11)$$

Onde:

$Z$  – resistência teórica da ligação para um prego (lb);

$D$  – diâmetro do pino (in);

$F_{yb}$  – resistência ao escoamento do aço do pino (psi);

$R_d$  – fator de redução (Tabela 2);

$R_e = F_{em}/F_{es}$ ;

$R_t = l_m/l_s$ ;

$l_m$  – espessura da peça principal (in);

$l_s$  – espessura da peça secundária (in);

$F_{em}$  – resistência ao embutimento da peça principal (psi);

$F_{es}$  – resistência ao embutimento da peça secundária (psi);

Os valores de  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são calculados através das Equações 12, 13 e 14, respectivamente.

$$k_1 = \frac{\sqrt{R_e + 2R_e^2 * (1 + R_t + R_t^2) + R_t^2 R_e^3 - R_e(1 + R_t)}}{(1 + R_e)} \quad (12)$$

$$k_2 = -1 + \sqrt{2(1 + R_e) + \frac{2F_{yb}(1 + 2R_e)D^2}{3F_{em}l_s^2}} \quad (13)$$

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2(1 + R_e)}{R_e} + \frac{2F_{yb}(2 + R_e)D^2}{3F_{em}l_s^2}} \quad (14)$$

Na Tabela 2, observam-se os Fatores de Redução ( $R_d$ ) para cada modo de ruptura da ligação, considerando que o diâmetro do pino a ser utilizado será maior ou igual a 1/4" e menor ou igual a 1".

**Tabela 2 – Fator de Redução para  $0.25" \leq D \leq 1"$ .**

Modos de Ruptura	Fator de redução	$K_\theta$
I <sub>m</sub> , I <sub>s</sub>	4 $K_\theta$	1 + 0,25( $\theta/90$ )
II	3,6 $K_\theta$	$\theta$ – ângulo máximo entre a direção da carga e a direção do pino ( $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ).
III <sub>m</sub> , III <sub>s</sub> , IV	3,2 $K_\theta$	

Fonte: NDS (AWC, 2015).

Para o cálculo da resistência ao embutimento ( $F_e$ ) da madeira deve-se analisar a relação da direção das fibras com a direção da força aplicada. Se forem paralelas entre si utiliza-se a Equação 15 e se forem perpendiculares, deve-se calcular com a Equação 16.

$$F_e = 11200 * G \quad (15)$$

$$F_e = \frac{6100G^{1,45}}{\sqrt{D}} \quad (16)$$

Onde:

$G$  – massa específica (adimensional);

$D$  – diâmetro (in).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo do comportamento das ligações na madeira tratada e não tratada, se fez necessária, além do conhecimento teórico, a realização de ensaios laboratoriais a fim de se obter parâmetros reais para a comparação entre ambas.

Com a finalidade de atender aos objetivos propostos nesse trabalho, inicialmente foram caracterizados os materiais envolvidos, através da determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira quanto ao teor de umidade, densidade aparente, retratibilidade e resistência à compressão paralela às fibras; e ainda a tensão de escoamento do aço do prego utilizado.

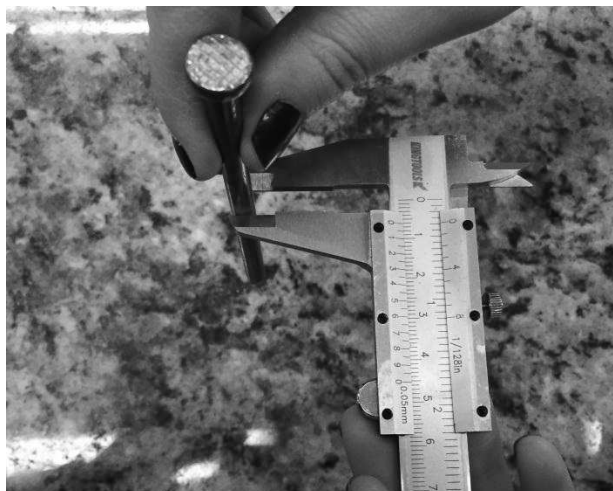
#### 3.1 MADEIRA UTILIZADA

Para a realização dos experimentos, foram utilizados corpos de prova de madeira do híbrido *Eucalyptus urograndis*, doados pela empresa Ouro Verde Florestal, localizada na cidade de Ouro Verde do Oeste, PR.

O tratamento da madeira foi realizado em autoclave, com líquido preservativo de composição CCA, na mesma empresa doadora da madeira, através do processo de “célula cheia” ou “Bethell”.

#### 3.2 PREGOS

Os pregos utilizados eram da marca Gerdau, 23x60, possuindo, pelo catálogo, 5,9mm de diâmetro e 138mm de comprimento. Entretanto, verificando em laboratório o diâmetro real do prego era de 6,2mm, como pode ser observado na Figura 10. Apesar da divergência, o prego se enquadra no proposto pela NBR 7190 (ABNT, 1997), possuindo um diâmetro menor que um quarto da menor espessura das peças componentes da estrutura.



**Figura 10 – Diâmetro real do prego.**

A escolha dos pregos se deu pela disponibilidade do material no mercado, considerando o comprimento necessário para a penetração do pino na seção intermediária do corpo de prova. Como a NBR 7190 (ABNT, 1997) prevê que os pregos utilizados deveriam adentrar toda a seção da peça intermediária, e o comprimento dos utilizados é maior que essa delimitação, os mesmos foram cortados com 75 mm de comprimento.

De acordo com o fabricante, o prego a ser utilizado é fabricado com aço SAE 1015. Esse material apresenta tensão de escoamento igual a 262 MPa e tensão última igual a 449 MPa (SILOTTI, 2015).

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

A caracterização da madeira, natural e tratada, foi realizada através de ensaios de umidade, compressão paralela às fibras, densidade aparente e retratibilidade.

#### 3.3.1 Ensaio de Umidade

Para esse ensaio foram utilizados 12 corpos de prova para cada estado da madeira (tratada e não tratada), seguindo as recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997), nas dimensões de 2 cm x 3 cm x 5 cm, conforme mostra a Figura 11.



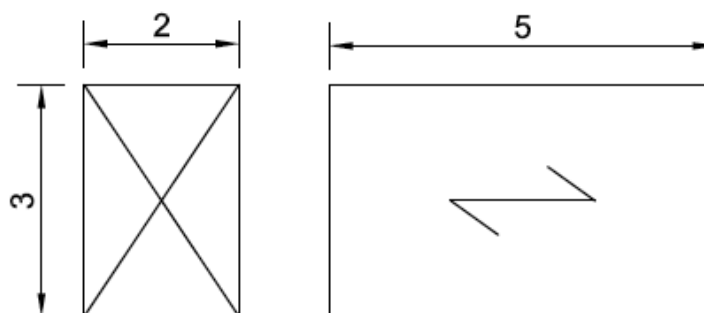


Figura 11 – Dimensões corpo de prova para determinação da umidade (cm).  
Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997)

Após pesados, os corpos de prova foram colocados em estufa, com temperatura de  $100 \pm 3^\circ\text{C}$ , sendo aferidas as massas a cada 6 horas, até se verificar variação menor que 0,5% da última massa medida, obtendo assim a massa seca.

Com os valores de massa úmida ( $M_i$ ) e massa seca ( $M_s$ ), foram calculadas as umidades de cada corpo de prova, utilizando a Equação 17.

$$U (\%) = \frac{M_i - M_s}{M_s} \times 100 \quad (17)$$

### 3.3.2 Resistência à Compressão Paralela às Fibras

Para a determinação da resistência a compressão paralela às fibras foram seguidas as recomendações da norma NBR 7190 (ABNT, 1997), utilizando 12 corpos de prova de seção transversal quadrada de 5 cm e 15 cm de comprimento, conforme Figura 12, para cada condição (tratada e não tratada).

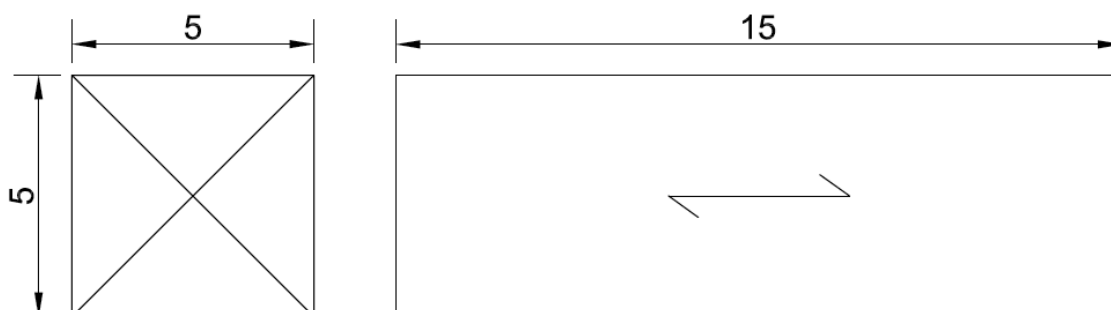


Figura 12 – Dimensões corpo de prova para determinação da resistência a compressão paralela às fibras (cm).  
Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997)

Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina universal de ensaios, com uma velocidade de carregamento igual a 10 MPa/min. A partir da máxima carga suportada ( $F_{c0,máx}$ ) e da área da seção do corpo de prova (A) foram calculadas as resistências à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ), utilizando a Equação 18.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad (18)$$

### 3.3.3 Densidade Aparente

De acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997), para a caracterização da densidade aparente, foram utilizados corpos de prova prismáticos, com seção transversal retangular de 2,0 cm x 3,0 cm de lado e comprimento ao longo das fibras de 5,0 cm, como mostrado na Figura 11.

O total de corpos de prova utilizados foi de 24 unidades, sendo 12 de madeira tratada e 12 de madeira não tratada.

Para a realização do ensaio os corpos de prova foram submetidos ao aquecimento em estufa, com temperatura máxima de  $100 \pm 3^\circ\text{C}$ , até atingirem umidade de 12%. A fim de garantir que a umidade seja a requerida, foram realizados cálculos para encontrar a massa e o volume que o corpo de prova deveria conter, baseados nos resultados no ensaio de umidade.

A densidade aparente foi calculada com os dados da umidade a 12%, utilizando a Equação 19.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12\%}}{v_{12\%}} \quad (19)$$

Assim como Alves (2017), após calculadas as densidades, foram estimadas as reais umidades de cada corpo de prova, fazendo-se a correção para umidade de referência de 12% através da Equação 20, considerando a ISO 3130 (1975). Esta equação se mostra necessária, pois na prática não é possível obter a exata massa calculada para 12%, uma vez que a previsão destas é feita com base na umidade média do lote, podendo ocorrer divergências para cada peça.

$$\rho_{12} = \rho_U x \left[ 1 - \frac{(1 - k)x(U - 12)}{100} \right] \quad (20)$$

Onde:

$\rho_{12}$  – densidade aparente a 12% de umidade, kg/m<sup>3</sup>;

$k$  – coeficiente volumétrico para mudança de 1% de umidade, e que seu valor é igual a  $0,85 \times 10^{-3} \times \rho_U$ ;

$\rho_U$  – densidade aparente a U% de teor de umidade, kg/m<sup>3</sup>;

$U$  – teor de umidade em que se encontra o corpo de prova, %.

### 3.3.4 Retratibilidade

Para o ensaio de retratibilidade foram utilizados 12 corpos de prova prismáticos para cada estado da madeira (natural e tratada). Os corpos de prova possuíam, de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997), seção transversal retangular de 2,0 cm x 3,0 cm de lado e comprimento ao longo das fibras de 5,0 cm, como mostrado na Figura 11.

Seguindo as recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997), os corpos de prova foram primeiramente saturados, até atingirem a constância de massa, sendo aferida a sua massa e todas as suas dimensões. Posteriormente, os corpos de prova foram colocados em estufa até secarem totalmente, sendo obtidos os mesmo dados.

Com os dados encontrados, foram realizados cálculos seguindo as Equações 21 e 22, respectivamente, para a retração e inchamento, nas direções radial, tangencial e longitudinal.

$$\varepsilon_{r,i} = \frac{L_{i,sat} - L_{i,seca}}{L_{i,sat}} \times 100 \quad (21)$$

$$\varepsilon_{i,i} = \frac{L_{i,sat} - L_{i,seca}}{L_{i,seca}} \times 100 \quad (22)$$

Onde:

$\varepsilon_{r,i}$  – deformação específica de retração na direção analisada do corpo de prova, em porcentagem;

$\varepsilon_{i,i}$  – deformação específica de inchamento na direção analisada do corpo de prova, em porcentagem;

$L_{i,sat}$  – dimensão na direção analisada do corpo de prova saturado, em cm;

$L_{i,seca}$  – dimensão na direção analisada do corpo de prova seco, em cm;

Analisando as três dimensões conjuntamente, deve ser feito o cálculo da variação volumétrica para cada corpo de prova, através da Equação 23.

$$\Delta V = \frac{V_{sat} - V_{seca}}{V_{seca}} \times 100 \quad (23)$$

Onde:

$\Delta V$  – variação volumétrica do corpo de prova, em porcentagem;

$V_{sat}$  – volume do corpo de prova saturado, em cm<sup>3</sup>;

$V_{seca}$  – volume do corpo de prova seco, em cm<sup>3</sup>;

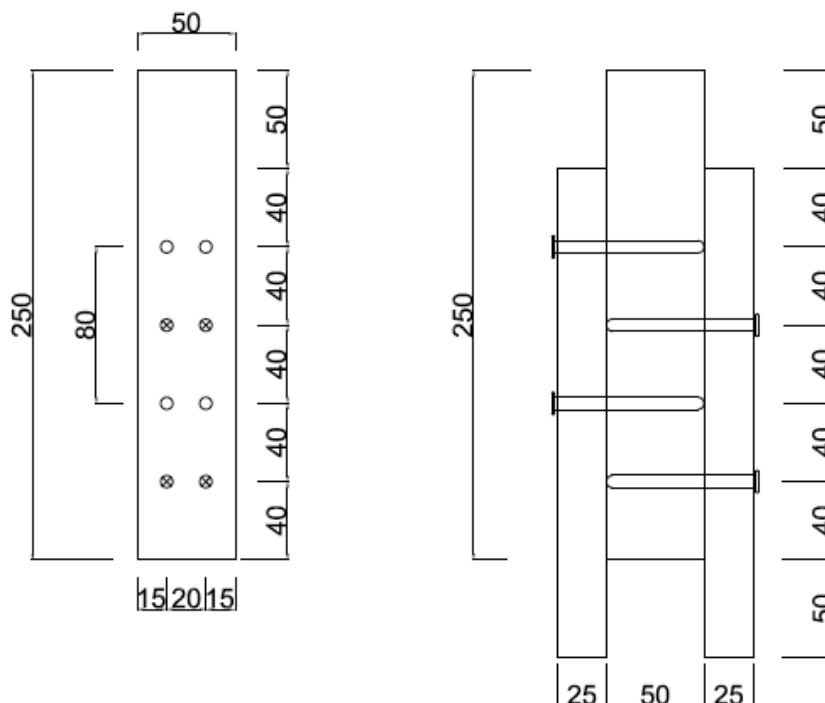
### 3.4 CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE LIGAÇÃO

A amostra foi composta por dois lotes de 8 corpos de prova, os quais correspondem às madeiras natural e tratada.

Ambos os lotes foram confeccionados utilizando madeira com umidade entre 10 e 20%. O lote de madeira tratada foi seco previamente exposto ao ambiente e posteriormente submetido a secagem em estufa, devido ao alto resultado encontrado no ensaio de umidade. Já o lote de madeira natural foi seco somente em estufa.

Os corpos de prova eram compostos por três peças de madeira com comprimento de 250 mm, e seção transversal de 5 cm x 5 cm para a peça principal e de 2,5 cm x 5 cm para as peças laterais, ligadas por 8 pregos 23x60, posicionados

conforme apresentado na Figura 13 (quatro em cada lado), com espaçamentos determinados pela NBR 7190 (ABNT, 1997), formando uma ligação rígida.



**Figura 13 – Dimensões dos corpos de prova, em mm.**

Previamente à fixação dos pregos nos corpos de prova, foi feita a pré-furação com broca de 6,00 mm de diâmetro, correspondente a 0,98 vezes o diâmetro do prego, utilizando uma furadeira de bancada. A inserção dos pregos foi realizada por impacto, utilizando um martelo.

### 3.5 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Os corpos de prova foram ensaiados na máquina universal de ensaio, com uma velocidade de aplicação da carga de compressão de 10 MPa/min, até atingir a ruptura, seguindo as recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997). Em cada corpo de prova foi fixada uma cantoneira metálica, servindo de base para o extensômetro, conforme observado na Figura 14, com o objetivo de medir os deslocamentos da ligação ao longo do carregamento.



**Figura 14 – Instrumentação dos corpos de prova.**

A carga axial aplicada foi medida por uma célula de carga instalada na máquina.

Foram considerados como estados limites a força aplicada quando ocorrido um deslocamento de 10 mm na ligação (ELS) e a carga última suportada pela ligação (ELU).

Como a norma seguida prevê que a resistência da madeira é correspondente a uma condição padrão de referência, definida pelo teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%, o resultado da resistência da ligação pregada de cada corpo de prova foi corrigido para a umidade padrão. A correção se deu através da Equação 24, prevista na NBR 7190 (ABNT, 1997).

$$f_{12} = f_{u\%} \times \left[ 1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (24)$$

Onde:

$f_{12}$  – resistência a 12% de umidade;  
 $f_{u\%}$  – resistência a u% de umidade;  
 $U\%$  – umidade do corpo de prova (%).

### 3.6 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA TEÓRICA DAS LIGAÇÕES

Segundo Baena (2015), a norma brasileira superdimensiona a quantidade de parafusos necessários para atingir a resistência esperada, além do cálculo baseado na NBR 7190 (ABNT, 1997), citada no item 2.5.1, as resistências teóricas das ligações também foram determinadas através da norma europeia EUROCODE 5 (CEN, 2004) e da norma americana NDS (AWC, 2015), demonstradas nos itens 2.5.2, 2.5.3, respectivamente, com o objetivo de se obter outros critérios de comparação para os resultados.

As ligações foram analisadas em corte simples, posteriormente dobrando os valores obtidos, uma vez que os pregos não atravessam a peça completamente, porém tem-se a mesma quantidade de pinos em cada lado do corpo de prova.

### 3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As resistências experimentais resultantes para as condições de madeira tratada e não tratada foram comparadas estatisticamente entre si através da análise estatística de variância e de média (ANOVA). A verificação da variância foi feita através do Teste F, com o auxílio do software Action Stat, enquanto que a média pelo Teste T por meio do mesmo programa. Ambos os testes foram realizados a um nível de 95% de confiabilidade, sendo considerados resultados diferentes aqueles que apresentavam P-valor menor que 5%.

Ademais, os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com as resistências teóricas calculadas no tópico 3.6, verificando se as mesmas estão dentro dos valores aceitáveis para as três normas, em relação a cada condição da madeira.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

#### 4.1.1 Ensaio de Umidade

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados do ensaio de umidade para a madeira em ambos os estados.

Tabela 3 – Resultados do Ensaio de Umidade.

MADEIRA NATURAL				MADEIRA TRATADA			
CP	Massa Inicial (g)	Massa Seca (g)	Teor de Umidade (%)	CP	Massa Inicial (g)	Massa Seca (g)	Teor de Umidade (%)
1	19,19	15,93	20,46	1T	20,18	15,92	26,76
2	18,74	15,02	24,77	2T	21,11	16	31,94
3	19,4	15,18	27,80	3T	22,63	14,96	51,27
4	21,9	18,27	19,87	4T	23,38	16,87	38,59
5	19,8	16,32	21,32	5T	22,22	16,86	31,79
6	19,01	15,63	21,63	6T	26,29	15,61	68,42
7	18,21	14,52	25,41	7T	23,8	15,42	54,35
8	19,61	16,09	21,88	8T	26,82	15,76	70,18
9	20,71	16,44	25,97	9T	26,36	15,78	67,05
10	18,58	15,14	22,72	10T	26,44	15,68	68,62
11	19,5	16,01	21,80	11T	26,57	15,98	66,27
12	18,33	15,05	21,79	12T	22,82	17,04	33,92
	<b>Média</b>		22,95		<b>Média</b>		50,76
	<b>Coefficiente de Variação</b>		10,67		<b>Coefficiente de Variação</b>		32,41

Através da média obtida para os dois estados da madeira verifica-se que a madeira tratada apresentou umidade superior à madeira natural. Tal diferença se justifica pela presença do líquido preservativo nas peças tratadas, uma vez que durante o processo em autoclave a madeira é saturada com o composto químico.

Outro aspecto que influenciou a umidade da madeira tratada apresentar um resultado 203,75% maior, em relação a natural, é a grande quantidade de alburno na madeira utilizada, o que contribui para a melhor impregnação do líquido preservativo nas peças de madeira tratadas.

#### 4.1.2 Resistência à Compressão Paralela às Fibras



Na Tabela 4 estão apresentados os resultados referentes ao ensaio de resistência à compressão paralela às fibras a 12% de umidade, sendo observados os valores da seção e da carga resistida por cada corpo de prova, e ainda, em suas últimas linhas os valores da média e coeficiente de variação de cada lote (natural e tratada).

**Tabela 4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras.**

MADEIRA NATURAL				MADEIRA TRATADA					
CP	Seção (mm)		Carga (N)	Resistência (MPa)	CP	Seção (mm)		Carga (N)	Resistência (MPa)
1	48,96	49,83	128900	52,83	1T	48,12	49,21	145100	61,28
2	48,55	49,29	148900	62,22	2T	48,76	49,06	162700	68,01
3	49,28	49,11	131000	54,13	3T	47,72	49,53	149700	63,34
4	49,73	49,04	110600	45,35	4T	48,74	49,55	154300	63,89
5	49,98	48,52	94570	39,00	5T	48,24	49,11	138300	58,38
6	48,35	48,41	125000	53,40	6T	48,9	49,76	139400	57,29
7	49,66	48,8	98140	40,50	7T	48,57	49,2	132100	55,28
8	48,07	48,04	127400	55,17	8T	48,45	49,8	125000	51,81
9	49,45	49,53	128100	52,30	9T	48,18	47,89	155100	67,22
10	47,76	48,35	107000	46,34	10T	48,29	48,48	155000	66,21
11	48,37	48,97	101000	42,64	11T	48,13	48,51	154000	65,96
12	46,94	48,61	122400	53,64	12T	49,07	49,37	132100	54,53
<b>Média</b>				<b>49,79b</b>	<b>Média</b>				<b>61,10a</b>
<b>Coeficiente de Variação (%)</b>				<b>13,96</b>	<b>Coeficiente de Variação (%)</b>				<b>9,00</b>

**Médias seguidas por letras diferentes diferem pelo Teste T – amostras independentes, com nível de 5% de significância.**

Diante da existência de diferença estatística significativa com nível de 95% de confiança entre as médias obtidas para a resistência à compressão paralela às fibras, verifica-se um aumento de 22,72% na resistência dos corpos de prova preservados em relação aos naturais, uma vez que a resistência em madeira tratada foi igual a 61,10 MPa e em madeira natural igual a 49,79 MPa.

A diferença é comprovada através da análise estatística pelo Teste T – amostras independentes, pois o *P*-valor obtido foi de 0,022%, sendo menor que 5%. As variâncias das amostras foram consideradas iguais pelo Teste F – duas variâncias, uma vez que o *P*-valor resultou em 45,10% (maior que 5%). Na Figura 15 estão apresentados os corpos de provas tratado e natural, evidenciando a diferença de resistências entre os dois lotes.



**Figura 15 – Corpo de prova 6 tratado e 8 natural após ensaio de compressão paralela às fibras.**

Para Pinheiro (2001), o acréscimo de resistência é decorrente da penetração da substância preservativa. Associando os resultados encontrados no presente estudo aos experimentos realizados por Pinheiro (2001), com madeira da espécie *Eucalyptus grandis*, e Faria et al. (2015), com *Eucalyptus camaldulensis*, tem-se a comprovação do pressuposto, uma vez que houve positiva influência na resistência à compressão paralela nas três pesquisas.

Apesar da maioria das pesquisas apresentarem o melhoramento desta propriedade mecânica, Souza; Vito (2015) obtiveram resultados em que para espécie *Eucalyptus citriodora* o tratamento da madeira não influenciou no ganho de resistência à compressão. Porém, através da identificação microscópica, a compressão em madeira natural apresentou destruição das macrofibras, fato não ocorrido na madeira tratada. Essa análise, por sua vez, justifica os valores de resistência à compressão em madeira natural serem menores que em madeira tratada para os demais estudos.

#### 4.1.3 Densidade Aparente

Os valores obtidos no ensaio de densidade aparente da madeira, tanto no seu estado natural quanto tratado estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado do ensaio de Densidade Aparente.

MADEIRA NATURAL									MADEIRA TRATADA								
CP	Massa (Kg)	Dimensões (cm)			Volume (m <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Densidade Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidade Aparente Corrigida (Kg/m <sup>3</sup> )	CP	Massa (Kg)	Dimensões (cm)			Volume (m <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Densidade Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidade Aparente Corrigida (Kg/m <sup>3</sup> )
		Lado a	Lado b	Lado c							Lado a	Lado b	Lado c				
1	16,84	5,24	3,01	2,04	32,18	6,65	523,38	538,92	1T	15,75	2,22	2,83	5,02	31,54	0	499,39	533,88
2	15,33	5,23	2,85	2,00	29,81	2,20	514,24	542,61	2T	16,16	2,20	2,82	5,13	31,83	0,87	507,75	539,86
3	19,47	5,32	2,68	2,07	29,51	6,10	659,70	676,79	3T	16,68	2,28	2,80	5,24	33,45	10,90	498,62	501,77
4	19,3	5,3	2,9	2,03	31,20	5,99	618,57	636,21	4T	15,77	2,12	2,85	5,24	31,66	0	498,10	532,57
5	16,29	5,2	2,87	2,00	29,85	5,78	545,77	563,97	5T	15,60	2,20	2,83	5,13	31,94	0	488,43	522,70
6	16,59	5,2	2,9	2,00	30,16	6,41	550,07	566,43	6T	17,55	2,11	2,83	5,12	30,57	11,93	574,03	574,25
7	16,04	5,23	2,81	2,00	29,39	6,72	545,72	561,16	7T	17,05	2,13	2,87	5,14	31,42	9,93	542,62	548,68
8	16,9	5,31	2,92	2,02	31,32	4,45	539,58	561,64	8T	17,14	2,16	2,86	5,15	31,81	8,48	538,75	549,02
9	16,72	5,21	2,91	2,04	30,93	6,97	540,60	555,29	9T	15,93	2,13	2,79	5,20	30,90	0,13	515,50	549,89
10	16,72	5,24	2,96	2,02	31,33	6,84	533,66	548,71	10T	15,91	2,06	2,81	5,24	30,33	1,40	524,52	555,33
11	17,41	5,18	3,05	2,01	31,76	5,07	548,24	568,53	11T	15,30	2,18	2,80	5,10	31,13	0	491,48	525,82
12	16,18	5,24	2,83	2,00	29,66	5,48	545,55	564,63	12T	17,79	2,12	2,83	5,15	30,90	3,85	575,77	599,72
<b>Média</b>							573,74a		<b>Média</b>							544,46b	
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>							7,10		<b>Coefficiente de Variação (%)</b>							4,65	

Médias seguidas por letras diferentes diferem pelo Teste T – amostras independentes, com nível de 5% de significância.

Os valores apresentados são referentes à massa e as dimensões de cada corpo de prova, resultando no volume e na densidade aparente, em específico.

Foi comprovada a diferença estatística significativa entre as médias obtidas para o resultado de densidade aparente em nível de 95% de confiança, uma vez que o *P*-valor obtido foi de 4,59%, sendo menor que 5%. As variâncias das amostras foram consideradas iguais pelo Teste F – duas variâncias, pois o *P*-valor resultou em 12,99% (maior que 5%). Sendo assim, a densidade aparente média em *Eucalyptus urograndis* natural foi maior do que na tratada em 5,38%, diferente dos resultados obtidos por Vivian et al. (2012) e Faria et al. (2015) quando avaliadas as espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus camaldulensis*, respectivamente. Entretanto, ressalta-se a necessidade de ensaios em maior número de corpos de prova para confirmar este resultado.

Os valores obtidos para a densidade aparente geralmente são relacionados ao comportamento da densidade básica da madeira, uma vez que ambas as propriedades são dependentes da espécie, porosidade, espessura da parede celular, rearranjo e tamanho das células. Dessa forma, os diferentes resultados para os dois estados da madeira podem ser comprovados pela influência do líquido preservativo na estrutura celular (PINHEIRO, 2001; FOELKEL, 2015).

Quando comparado com a densidade aparente do *Eucalyptus grandis* com tratamento preservativo, através do resultado médio obtido por Carvalho et al. (2015) de 0,56 g/cm<sup>3</sup>, a densidade do híbrido natural é igual a da espécie pela qual é formado, enquanto para o híbrido tratado a densidade é menor. Apesar da diferença na comparação, tanto a madeira tratada quanto a natural se enquadram na classe leve proposta por Carvalho (1996), pois ambas se encontram no intervalo de 0,50 g/cm<sup>3</sup> e 0,64 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.4 Retratibilidade

Todos os resultados obtidos para o ensaio de retração e inchamento da madeira estudada no estado natural e tratada estão apresentados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente, além do coeficiente anisotrópico, o qual é dado pela razão entre o resultado de retração na direção radial pelo valor da mesma propriedade na direção tangencial.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de retração e inchamento para madeira no estado natural.

CP	Saturada				Seca				Retração			Inchamento			Variação Volumétrica (%)	Coeficiente Anisotrópico
	mi (g)	T (cm)	R (cm)	L (cm)	mi (g)	T (cm)	R (cm)	L (cm)	T (%)	R (%)	L (%)	T (%)	R (%)	L (%)		
1	28,4	2,2	3,11	5,2	15,55	2,03	3	5,14	7,73	3,54	1,15	8,37	3,67	1,17	13,66	2,18
2	27,48	2,18	3,03	5,3	14,87	2,02	2,91	5,22	7,34	3,96	1,51	7,92	4,12	1,53	14,09	1,85
3	28,8	2,2	3,06	5,3	15,65	2,04	2,92	5,22	7,27	4,58	1,51	7,84	4,79	1,53	14,75	1,59
4	29,29	2,14	3,11	5,16	16,16	2	2,9	5,11	6,54	6,75	0,97	7,00	7,24	0,98	15,87	0,97
5	30,61	2,21	3,1	5,21	16,93	2,09	2,94	5,17	5,43	5,16	0,77	5,74	5,44	0,77	12,36	1,05
6	30,51	2,17	3,06	5,13	15,74	2,04	2,75	5,08	5,99	10,13	0,97	6,37	11,27	0,98	19,53	0,59
7	29,21	2,07	3,1	5,35	17,49	2	2,93	5,31	3,38	5,48	0,75	3,50	5,80	0,75	10,33	0,62
8	28,88	2,08	3,05	5,4	17,39	2	2,85	5,34	3,85	6,56	1,11	4,00	7,02	1,12	12,55	0,59
9	29,21	2,05	3,06	5,24	15,64	1,98	2,81	5,2	3,41	8,17	0,76	3,54	8,90	0,77	13,61	0,42
10	29,65	2,06	3,16	5,23	16,09	2	2,92	5,2	2,91	7,59	0,57	3,00	8,22	0,58	12,11	0,38
11	27,87	2,08	3,1	5,33	15,81	2,01	2,91	5,3	3,37	6,13	0,56	3,48	6,53	0,57	10,86	0,55
12	31,33	2,11	3,12	5,38	18,16	2,02	2,93	5,34	4,27	6,09	0,74	4,46	6,48	0,75	12,06	0,70
<b>Média</b>									5,12	6,18	0,95	5,44	6,62	0,96	13,48	0,96
<b>Coeficiente de variação</b>									33,55	28,82	32,45	35,29	30,91	32,79	17,54	59,96

Colunas denominadas T representam a direção tangencial do corpo de prova, R a direção radial e L a direção longitudinal.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de retração e inchamento para madeira tratada.

CP	Saturada			mi (g)	Seca			Retração			Inchamento			Variação Volumétrica (%)	Coeficiente Anisotrópico	
	T (cm)	R (cm)	L (cm)		T (cm)	R (cm)	L (cm)	T (%)	R (%)	L (%)	T (%)	R (%)	L (%)			
1	2,23	3	5,2	15,71	2,1	2,8	5,16	5,83	6,67	0,77	6,19	7,14	0,78	14,66	0,87	
2	2,33	3,06	5,16	16,16	2,22	2,85	5,1	4,72	6,86	1,16	4,95	7,37	1,18	14,01	0,69	
3	2,4	3,02	5,26	15,91	2,25	2,83	5,12	6,25	6,29	2,66	6,67	6,71	2,73	16,94	0,99	
4	2,34	3,04	5,11	16,51	2,24	2,85	5,08	4,27	6,25	0,59	4,46	6,67	0,59	12,09	0,68	
5	2,24	3	5,23	15,8	2,11	2,8	5,18	5,80	6,67	0,96	6,16	7,14	0,97	14,84	0,87	
6	2,31	3	5,11	15,52	2,15	2,82	5,08	6,93	6,00	0,59	7,44	6,38	0,59	14,97	1,15	
7	2,38	3,02	5,1	15,36	2,2	2,87	5,05	7,56	4,97	0,98	8,18	5,23	0,99	14,96	1,52	
8	2,3	2,94	5,07	16,21	2,08	2,76	5,02	9,57	6,12	0,99	10,58	6,52	1,00	18,96	1,56	
9	2,22	2,94	5,03	15,27	2,08	2,78	5	6,31	5,44	0,60	6,73	5,76	0,60	13,55	1,16	
10	2,37	3,05	5,11	16,61	2,25	2,83	5,11	5,06	7,21	0,00	5,33	7,77	0,00	13,52	0,70	
11	2,27	2,97	5,11	15,81	2,11	2,8	5,1	7,05	5,72	0,20	7,58	6,07	0,20	14,34	1,23	
12	2,23	3,04	5,14	15,3	2,1	2,83	5,1	5,83	6,91	0,78	6,19	7,42	0,78	14,97	0,84	
	<b>Média</b>								6,27	6,26	0,86	6,71	6,68	0,87	14,82	1,02
	<b>Coeficiente de variação</b>								22,58	10,49	77,18	24,33	11,14	78,31	11,76	29,87

Colunas denominadas T representam a direção tangencial do corpo de prova, R a direção radial e L a direção longitudinal.

Através de análise estatística por Teste F para variância e Teste T para médias, a nível de 5% de significância, obtiveram-se as avaliações de comparações entre os resultados referentes a madeira natural e tratada apresentados na Tabela 8.

Para a madeira natural, a variação volumétrica obtida foi de 13,48%, e o coeficiente de anisotropia (CA) de 0,96. A retração e o inchamento apresentaram comportamentos semelhantes para as mesmas direções, com porcentagens maiores para as direções tangencial e radial, e menores que 1% para a direção longitudinal. A retração e o inchamento na direção longitudinal obtiveram resultados entre 14 e 18% menores quando comparados com as demais direções.

A variação volumétrica obtida na caracterização da madeira tratada foi de 14,82% e o CA de 1,02. A relação entre os valores de retração e inchamento é semelhante ao observado para a madeira natural, porém os resultados para as direções tangencial e radial são mais próximos entre si para cada análise. As porcentagens de diferença na comparação entre retração e inchamento da direção longitudinal com as demais direções resultaram em um intervalo menor quando comparado com a madeira natural, sendo esse de 12 a 14%.

Comparando estatisticamente cada resultado na respectiva direção entre a madeira natural e tratada, através do Teste T, para todos os casos, foram obtidos P-valores maiores que 5%. Dessa forma, considera-se que todos os valores são considerados iguais estatisticamente para os dois lotes analisados, não havendo influência significativa do tratamento da madeira na estabilidade dimensional.

Ambos os resultados estão próximos dos encontrados por Faria et al. (2015) para *Eucalyptus camaldulensis*, com valores de 15,85% para a madeira tratada e 12,08% para a madeira natural. Aproximam-se ainda da pesquisa de Batista et al. (2010) para a espécie *Eucalyptus grandis* (componente do híbrido em estudo), o qual obteve uma média para a variação volumétrica de 14,10%.

Quanto ao coeficiente de anisotropia, os valores obtidos foram de 1,02 e 0,96 para a madeira tratada e natural, respectivamente. De acordo com

**Tabela 8 - Resultados análise estatística para os resultados de retração, inchamento, variação volumétrica e coeficiente anisotrópico entre madeira natural e tratada.**

		Retração			Inchamento			Varição Volumétrica	Coeficiente Anisotrópico
		T	R	L	T	R	L		
<b>Variância - Teste F</b>	<b>P-Valor (%)</b>	44,16	0,17	2,91	50,69	0,15	2,37	26,24	3,47
	<b>Conclusão</b>	Iguais	Diferentes	Diferentes	Iguais	Diferentes	Diferentes	Iguais	Diferentes
<b>Média - Teste T</b>	<b>P-Valor (%)</b>	9,78	88,89	66,40	10,25	93,06	67,70	14,00	73,86
	<b>Conclusão</b>	Iguais	Iguais	Iguais	Diferentes	Iguais	Iguais	Iguais	Iguais

**Colunas denominadas T representam a direção tangencial do corpo de prova, R a direção radial e L a direção longitudinal.**



Oliveira et al. (2010), tanto a madeira tratada quanto natural são consideradas ideais, pois os valores do CA são próximos de 1 nos dois lotes analisados. Assim, para ambos os estados da madeira, a contração é semelhante nos eixos tangencial e radial, tornando a madeira menos propensa a fendilhar e empenar durante as alterações dimensionais provocadas pela variação higroscópica.

Quando comparado com o CA da madeira tratada de *Eucayptus grandis* obtido por Carvalho et al. (2015), sendo esse igual a 1,59, o híbrido em estudo, tanto natural quanto tratado, é considerado menos propenso a defeitos causados pela mudança de temperatura. Tal fato comprova melhoramentos na propriedade a partir do cruzamento de duas espécies distintas.

## 4.2 RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO PREGADA

### 4.2.1 Madeira Natural

Para o ensaio de resistência da ligação pregada em corpos de prova compostos por madeira natural, foram obtidos resultados referentes a cargas de serviço e cargas de ruptura. A primeira foi encontrada através da força aplicada ao corpo de prova no momento em que o deslocamento da ligação foi igual a 10mm, uma vez que esse foi considerado o valor máximo para garantir a segurança da estrutura. Já a carga limite de ruptura foi dada pela força máxima determinante para a ruptura do corpo de prova. Ambos os resultados estão apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9 – Resultados do ensaio de umidade e resistência da ligação para corpos de prova com madeira natural.**

CP	Seção (mm)		Umidade (%)	Deslocamento (mm)	Carga de Serviço (N)	Carga de Ruptura (N)	Carga de Serviço Corrigida (N)	Carga de Ruptura Corrigida (N)
1	47,11	48,69	10,72	10	33400	38360	32121,88	36892,08
2	50,13	50	12,35	10	34900	40930	35268,49	41362,15
3	48,5	47,2	10,05	10	36700	38110	34549,03	35876,39
4	50,22	50,35	13,10	10	37200	44710	38432,35	46191,14
5	50,77	50,29	12,01	10	37000	46890	37012,32	46905,61
6	48,81	48,29	11,20	10	30300	32610	29573,78	31828,42
7	50	49,6	12,45	10	35100	37500	35575,34	38007,84
8	47,46	48,8	10,81	10	35900	36000	34621,66	34718,10
<b>Média (N)</b>							34644,36	38972,72
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>							7,96	13,88

Comparando os resultados médios das cargas resultantes no ensaio de resistência da ligação para os corpos de prova com madeira natural, observa-se que a carga de ruptura apresentou resultado médio 12,49% maior que a carga média de serviço.

Por conseguinte, para estruturas que possuem as mesmas características que os corpos de prova confeccionados com madeira natural, a máxima carga suportada é igual 34,64 kN, sendo esse o valor que possibilita um deslocamento máximo de 10mm.

#### 4.2.2 Madeira Tratada

Analisando os resultados obtidos para o ensaio de ligação com corpos de prova produzidos com peças de madeira tratada, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 – Resultados do ensaio de umidade e resistência da ligação para corpos de prova com madeira tratada.**

CP	Seção (mm)		Umidade (%)	Deslocamento (mm)	Carga de Serviço (N)	Carga de Ruptura (N)
1	48,51	48,33	0,03	4,7	-	30460,00
2	48,89	48,17	0,00	5,4	-	33000,00
3	48,34	47,75	0,46	6,3	-	33640,00
4	48,78	48,72	0,00	6,1	-	32790,00
5	48,9	49,08	0,03	4,65	-	30860,00
6	48,87	48,16	0,18	6,2	-	36040,00
7	48,86	49,3	0,00	5,05	-	31960,00
8	48,6	48,78	0,16	6,3	-	32390,00
<b>Média (N)</b>						32642,50
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>						5,33

Para esse estado da madeira, não foram consideradas cargas de serviço, uma vez que os deslocamentos não atingiram o limite de 10 mm, sendo o maior deles igual a 6,3 mm. Desta forma, a máxima carga suportada por estruturas montadas nas mesmas circunstâncias que os corpos de prova com madeira tratada é de 32,64 kN, uma vez que essa é a média da carga de ruptura.

Por apresentarem umidade abaixo do limite de 10% estabelecido pela NBR 7190 (ABNT, 1997), os resultados das resistências dos corpos de prova com madeira tratada não passaram por correção de umidade.

#### 4.2.3 Comparação Entre Ligações com Madeira Natural e Tratada

A fim de se estabelecer critérios para a comparação entre a resistência da ligação em corpos de prova com madeira tratada e natural, primeiramente, levou-se em conta a carga máxima passível de utilização para ambos os casos. Como citado anteriormente, devido ao deslocamento máximo ter sido atingido no caso natural, a carga considerada na comparação para essa variável foi a carga de serviço. Diversamente, por a variável tratada não ter atingido o deslocamento limite, a carga comparada foi de ruptura. Ambos os resultados estão apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 – Resistências da ligação para o deslocamento de 10mm em corpos de prova de madeira natural e tratada.**

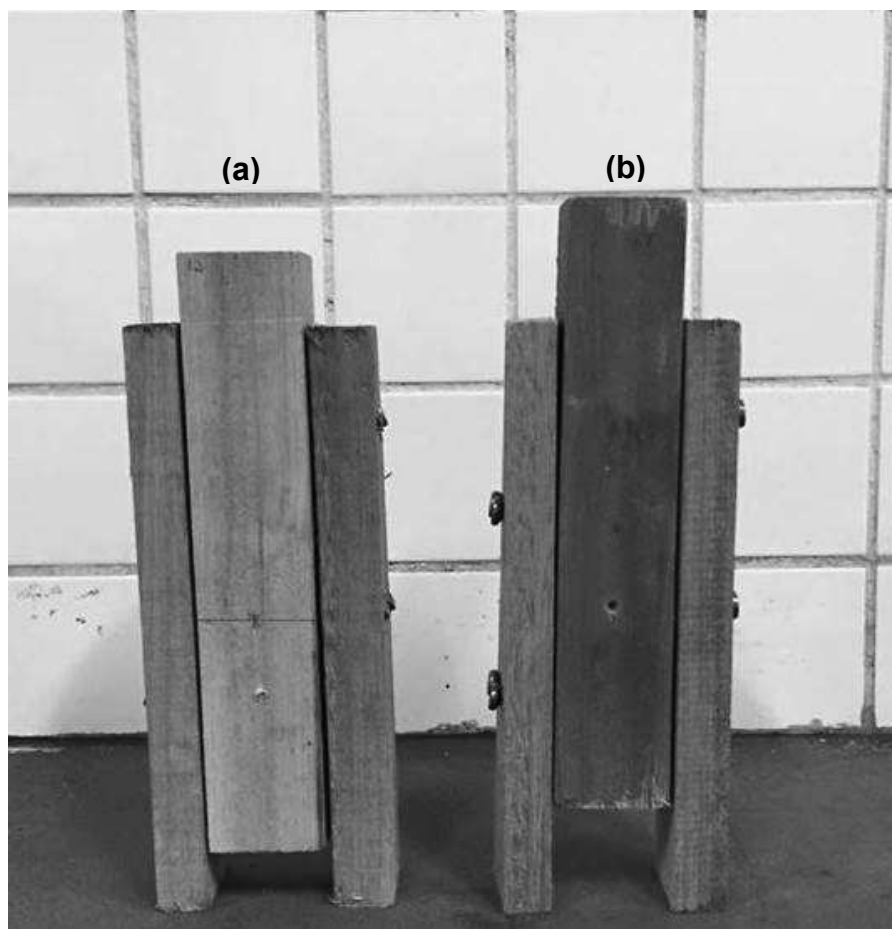
CP	Natural		Tratada	
	Deslocamento (mm)	Resistência (N)	Deslocamento (mm)	Resistência (N)
1	10	32121,88	4,7	30460,00
2	10	35268,49	5,4	33000,00
3	10	34549,03	6,3	33640,00
5	10	38432,35	6,1	32790,00
5	10	37012,32	4,65	30860,00
6	10	29573,78	6,2	36040,00
7	10	35575,34	5,05	31960,00
8	10	34621,66	6,3	32390,00
	<b>Média (N)</b>	34644,36a	<b>Média (N)</b>	32642,50a
	<b>Coefficiente de Variação (%)</b>	7,96	<b>Coefficiente de Variação (%)</b>	5,33

**Médias seguidas por letras diferentes diferem pelo Teste T – amostras independentes, a nível de 5% de significância.**

Estatisticamente através do Teste T, as médias para as cargas máximas nos dois estados se mostraram iguais a nível de 5% de significância, pois o P-valor obtido foi de 10,45%, ou seja, maior que 5%. As variâncias foram consideradas iguais pelo Teste F, com um P-valor resultante maior que 5% e igual a 24,60%.

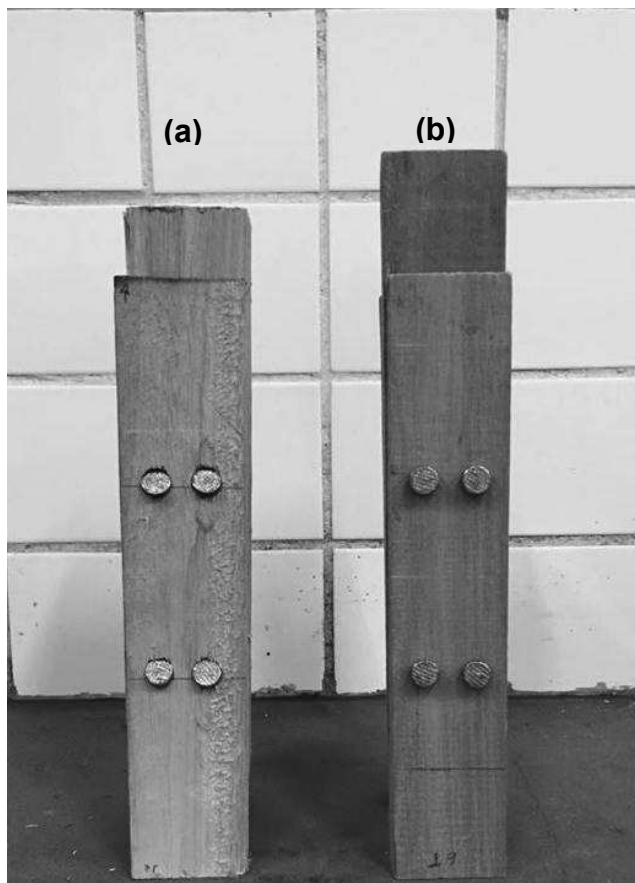
Diante da igualdade das resistências e analisando a grande diferença nos deslocamentos ocorridos para cada estado da madeira, considera-se que a madeira tratada é mais propícia para utilização estrutural.

Na Figura 16 é possível observar com clareza a diferença nos deslocamentos obtidos através do extensômetro durante o ensaio de resistência da ligação para os corpos de prova confeccionados com madeira natural e tratada, respectivamente.



**Figura 16 - Deslocamento após ensaio de resistência da ligação entre corpos de prova com madeira natural (a) e tratada (b).**

Observa-se através da Figura 17 que em ambos os casos a ruptura da ligação se deu por flexão no pino. A análise é mais evidente no corpo de prova de madeira natural devido ao maior deslocamento e, conseqüentemente, acentuada flexão.



**Figura 17 – Ruptura por flexão no pino no corpo de prova com madeira natural (a) e tratada (b), respectivamente.**

O fato de uma mesma carga ocasionar deslocamentos distintos pode ser justificado por cada estado da madeira apresentar um módulo de elasticidade específico. Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão x deformação, em valores correspondentes a resistência.

Por seguinte, com os dados na Tabela 12 foram comparados estatisticamente os valores das resistências máximas para os dois estados da madeira. Os dados dos corpos de prova de madeira tratada permaneceram os mesmos da análise anterior, enquanto que os dados da madeira natural passaram a ser a resistência de ruptura.

**Tabela 12 – Carga de ruptura da ligação entre corpos de prova naturais e tratados.**

CP	Natural	Tratada
	Resistência à Ruptura (N)	Resistência à Ruptura (N)
1	36892,08	30460
2	41362,15	33000
3	35876,39	33640
4	46191,14	32790
5	46905,61	30860
6	31828,42	36040
7	38007,84	31960
8	34718,10	32390
<b>Média (N)</b>	38972,72a	32642,50b
<b>Coefficiente de Variação (%)</b>	13,87674065	5,32601405

**Médias seguidas por letras diferentes diferem pelo Teste T – amostras independentes, a nível de 5% de significância.**

Através do Teste T a nível de 5% de significância, as resistências de ruptura foram consideradas diferentes, uma vez que o P-valor encontrado foi de 1,27%, menor que 5%. Já as variâncias foram consideradas iguais pelo Teste F, com um P-valor igual a 0,78%.

Dessa forma, considerando a máxima resistência suportada pela estrutura e não levando em conta o deslocamento tolerado, a ligação em madeira natural apresentou resistência 19,39% maior que em madeira tratada.

Analisando a resistência máxima da ligação conjuntamente a densidade aparente, há uma relação em que a madeira natural com maior densidade aparente resultou em uma resistência final maior para o ensaio de ligação, em comparação com a madeira tratada, seguindo resultados semelhantes aos obtidos por Lucas Filho (2012).

Apesar da carga de ruptura ser maior para corpos de prova com madeira natural, fica comprovada a melhoria na resistência da ligação da estrutura com a utilização de madeira tratada, uma vez que para cargas iguais (carga de serviço), a segurança é dada pelo menor deslocamento.

#### 4.3.4 Comparação com Estimativas da Norma

Foram calculadas as resistências teóricas das ligações através das normas brasileira, europeia e americana.

A seção das peças de madeira utilizadas para os ensaios experimentais e conseqüentemente para os cálculos apresentavam as menores espessuras com 25 mm e 50 mm para as peças secundária e principal, respectivamente. As demais características necessárias para os resultados analíticos da NBR 7190 (ABNT, 1997) e EUROCODE 5 (CEN, 2004) estão apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13 – Propriedades da madeira.**

<b>NATURAL</b>	<b>f<sub>ed</sub> (MPa)</b>	49,79
	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	573,74
<b>TRATADA</b>	<b>f<sub>ed</sub> (MPa)</b>	61,10
	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	544,46

Os dados do aço necessários para os cálculos através das normativas estão apresentados na Tabela 14.

**Tabela 14 - Propriedades do prego**

<b>d prego (mm)</b>	6,2
<b>d furo (mm)</b>	6,7
<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	30,19
<b>f<sub>yk</sub> (MPa)</b>	262
<b>f<sub>yb</sub> (Psi)</b>	37999,88
<b>f<sub>uk</sub> (MPa)</b>	449

A partir dos dados propostos, estão apresentados na Tabela 15 os resultados finais e valores auxiliares para o cálculo através da NBR 7190 (ABNT, 1997).

**Tabela 15 – Estimativa da resistência da ligação segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997).**

	<b>NATURAL</b>	<b>TRATADA</b>
<b>β</b>	3,73	3,73
<b>β<sub>lim</sub></b>	2,87	2,59
<b>Classificação da Ruptura</b>	Flexão no pino	Flexão no pino
<b>Rvd,1 (N)</b>	2563,64	2839,79
<b>Nº Pregos (un.)</b>	8,00	8,00
<b>Rvd,n (N)</b>	20509,16	22718,35

A norma brasileira, através da relação entre  $\beta$  e  $\beta_{lim}$ , determinou e calculou a resistência da ligação por ruptura pela flexão do pino tanto para a madeira tratada quanto para a madeira natural. A forma de ruptura foi a mesma observada



experimentalmente para ambos os estados da madeira. O resultado encontrado se apresentou 47,37% menor que o resultado experimental para a madeira natural e 30,40% para a madeira tratada, apresentando relação entre os resultados referentes à madeira tratada e natural distintos do experimental, uma vez que teoricamente a madeira tratada suportou carga maior que a natural.

Como podem ser observados na Tabela 16, os cálculos referentes à norma europeia resultaram em valores 45,98% menor em comparação ao valor experimental para a madeira natural e 38,50% para a madeira tratada, sendo que os resultados normativos seguem o padrão dos resultados experimentais (resistência dos corpos de prova com madeira natural maior que com madeira tratada).

**Tabela 16 – Estimativa da resistência da ligação segundo EURODOE 5 (CEN, 2004).**

	NATURAL	TRATADA
$F_{h,1,k}$ (MPa)	44,13	41,88
$F_{h,2,k}$ (MPa)	44,13	41,88
$\beta$	1	1
$M_{y,rk}$ (N)	23210,11	23210,11
$F_{v,rk}$ a (N)	6840,12	6491,02
$F_{v,rk}$ b (N)	13680,24	12982,03
$F_{v,rk}$ c (N)	9296,39	8821,99
$F_{v,rk}$ d (N)	3285,82	3159,90
$F_{v,rk}$ e (N)	2631,84	2509,35
$F_{v,rk}$ f (N)	4098,39	3992,43
$F_{v,rk}$ (N)	2631,84	2509,35
Nº de pregos (un.)	8,00	8,00
$F_{v,rk}$ (N)	21054,74	20074,84

Para ambos os estados da madeira, a ruptura pela EUROCODE 5 (CEN, 2004) ocorreu pelo modo (e) apresentado no item 2.5.2, referente a falha da ligação através da flexão do pino metálico apenas na peça de madeira de menor espessura.

Para o cálculo através da NDS (AWC, 2015), foi necessário alterar as unidades utilizadas para a caracterização da madeira nas demais normas, resultando nos dados apresentados na Tabela 17.

**Tabela 17 – Caracterização da madeira para cálculos referentes à NDS (AWC, 2015).**

	NATURAL	TRATADA
Massa Específica	0,61	0,58
Diâmetro (in)	0,24	0,24
$I_s$ (in)	0,98	0,98

$I_m$ (in)	1,97	1,97
$F_{es}$ (psi)	6866,84	6516,37
$F_{em}$ (psi)	6866,84	6516,37
$R_e$	1	1
$R_t$	2	2

Os coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  estão apresentados na Tabela 18. Porém, assim como para as demais normas, os fatores de redução ( $R_d$ ) foram desconsiderados na resistência analítica pela NDS.

**Tabela 18 – Coeficientes para NDS (AWC, 2015).**

	NATURAL	TRATADA
$k_1$	0,68	0,68
$k_2$	1,16	1,17
$k_3$	1,16	1,17

De forma adversa a norma europeia, o modo de ruptura que resultou nas menores resistências para os corpos de prova de madeira natural e tratada para os cálculos baseados na NDS (AWC, 2015) foi referente a formação de duas rótulas plásticas por plano de corte com esmagamento de ambas as peças, sendo o modo de ruptura IV, conforme os resultados apresentados na Tabela 19.

**Tabela 19 – Estimativa da resistência da ligação segundo a NDS (AWC, 2015).**

	NATURAL	TRATADA
Z Im (lb)	3299,51	3131,11
Z Is (lb)	1649,75	1565,55
Z II (lb)	1120,92	1063,71
Z IIIm (lb)	1279,65	1223,16
Z IIIs (lb)	639,83	611,58
Z IV (lb)	555,68	541,31
Z (lb)	555,68	541,31
Nº de pregos (un.)	8,00	8,00
RESISTÊNCIA (lb)	4445,42	4330,49
RESISTÊNCIA (N)	19774,22	19263,00

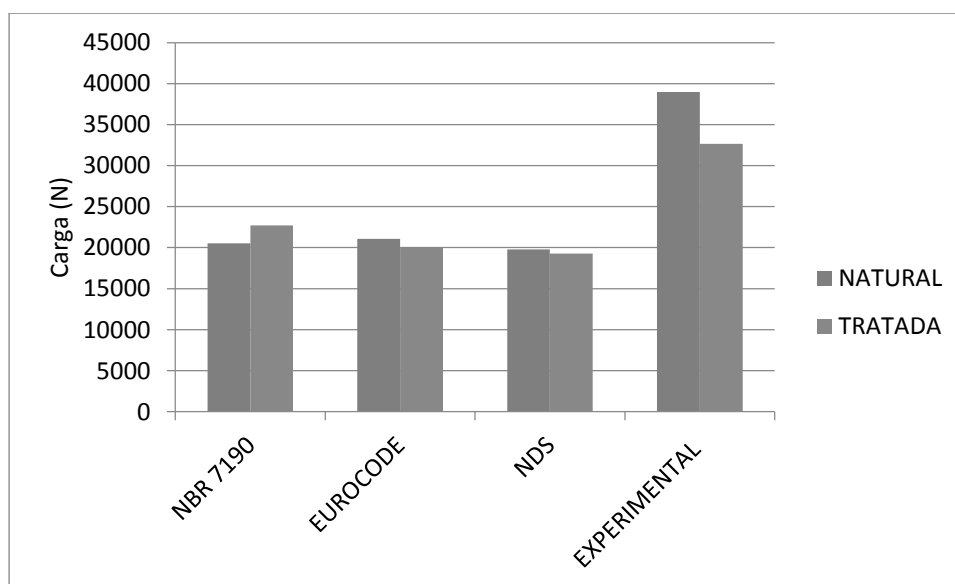
Comparativamente aos resultados experimentais, os cálculos através da norma americana resultaram em valores 49,26% menores para a madeira natural e 40,99% para a madeira tratada, mantendo a mesma relação de superioridade entre os resultados normativos e experimentais.

Na Tabela 20, estão apresentados os valores das resistências calculadas pelas normas brasileira, europeia e americana além dos resultados experimentais, a fim de facilitar a comparação. Observa-se que para efeito de comparação os resultados experimentais de carga máxima da ligação foram utilizados em valores médios.

**Tabela 20 – Resultados experimentais e estimativas de resistência da ligação pregada.**

	NATURAL	TRATADA
<b>NBR 7190 (N)</b>	20509,16	22718,35
<b>EUROCODE (N)</b>	21054,74	20074,84
<b>NDS (N)</b>	19774,22	19263,00
<b>EXPERIMENTAL (N)</b>	38972,72	32642,50

Os resultados da Tabela 20 são expressos em forma gráfica na Figura 18, onde o eixo das abscissas apresenta os modelos analíticos e o ensaio experimental, o eixo das coordenadas os valores de resistência da ligação e as cores das barras o estado da madeira (natural e tratada).



**Figura 18 - Resultados experimentais e estimativas de resistência da ligação pregada.**

Analisando a Tabela 20 e a Figura 18, tem-se que o resultado obtido através do método de cálculo proposto pela EUROCODE 5 (CEN, 2004) é o que mais se aproxima do resultado experimental para ambos os estados da madeira, mesmo havendo relevante diferença, seguido da NBR 7190 (ABNT, 1997) e NDS (AWC, 2015). Apesar do resultado referido pela NBR 7190 (ABNT, 1997) para a madeira

tratada se aproximar mais do experimental em comparação com as demais, o mesmo não pode ser considerado pertinente pelo fato da relação natural/tratado não condizer com os resultados experimentais.

Os valores propostos pela EUROCODE 5 (CEN, 2004) mesmo sendo os mais significativos, podem ter apresentado grande diferença dos resultados experimentais pelo fato do efeito de corda ter sido desprezado nos cálculos. Maia (2016) e Goés e Silva Junior (2017), ao analisarem a norma europeia com e sem o efeito de corda, atingiram valores consideravelmente próximos dos valores experimentais ao incluírem a segunda parcela nos cálculos. Porém, de modo semelhante aos resultados obtidos no presente trabalho, ao desconsiderar o efeito de corda, os resultados normativos se tornaram mais distantes do obtidos através de ensaios.

O distanciamento dos valores obtidos pela norma brasileira em relação aos valores experimentais pode ser explicado pelo resultado analítico proveniente da NBR 7190 (ABNT, 1997) ser oriundo da equação proposta para falha da ligação por flexão do pino metálico, que considera apenas a resistência ao escoamento do prego. Em contrapartida, as normas europeia e americana consideram em seus cálculos, além da característica do pino, o atrito entre as peças e as resistências de embutimento da madeira, obtendo, dessa forma, resultados mais próximos do real.

Pelo fato do procedimento de carga ter sido realizado baseando-se na norma brasileira, os resultados oriundos das demais normas podem ter sido valores diferentes das resistências que seriam obtidas quando comparados aos resultados de ensaios segundo as respectivas normas, devido à diferença entre os limites de ensaio estipulados pelas normas. Esse fato explica a razão pelo qual autores como Maia (2016), Baena (2015) e Goés; Silva Júnior (2017) obtiveram resultados normativos pela EUROCODE 5 (CEN, 2004) diferindo menos dos experimentais.

Para os cálculos baseados nos documentos normativos EUROCODE 5 (CEN, 2004) e NDS (AWC, 2015) se fez necessário o cálculo da resistência de embutimento, o qual é baseado na densidade da madeira e no diâmetro do pino. Já a norma brasileira iguala a resistência ao embutimento com a resistência à compressão na mesma direção, justificando as diferenças de valores obtidos entre as duas primeiras normas e a última.

Considerando a segurança das estruturas, os resultados analíticos obtidos para as três normas são satisfatórios, uma vez que apresentam cargas máximas

inferiores aos resultados experimentais, independente da relação entre madeira natural e tratada.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos através dos ensaios e cálculos realizados, pode-se concluir que:

- A madeira tratada com impregnação por pressão com preservativos do tipo CCA adquiriu melhores resultados para a resistência à compressão paralela às fibras, se comparada com a madeira natural, com um aumento de 22,75%. A densidade aparente, por sua vez, apresentou resultados superiores para a caracterização da madeira natural, com um acréscimo de 5,38% quando comparada com a madeira submetida a preservativo. O ensaio de retratibilidade, ao contrário das demais propriedades, apresentou resultados iguais estatisticamente para a madeira tratada e natural, impossibilitando a conclusão de influência positiva ou negativa referente à ação do preservativo.
- O tratamento preservativo com CCA em madeira de *Eucalyptus urograndis* altera as propriedades características do material, podendo ser benéfico ou não, dependendo da peculiaridade a ser analisada.
- Analisando as resistências experimentais das ligações, e considerando o conforto e segurança da edificação e dos usuários, a utilização da madeira tratada é mais indicada, devido ao acréscimo de 78,97% no deslocamento da madeira natural comparada à madeira com preservativo. Desta forma, observa-se que após análise de todos os ensaios efetuados e citados, o processo de tratamento em autoclave com preservativo CCA, além de garantir maior durabilidade e resistência aos agentes de degradação físicos e biológicos, torna menor o deslocamento ocasionado na estrutura devido à carga na ligação com peças estruturais de madeira de *Eucalyptus urograndis*.
- Em relação a comparação entre modelos teóricos de documentos normativos nacionais e internacionais com resultados experimentais, o modelo de cálculo proposto pela EUROCODE 5 (CEN, 2004) se apresentou mais eficiente que os demais modelos para ligações com oito pregos de 6,2mm de diâmetro a corte simples em madeira *Eucalyptus urograndis*, enquanto que os resultados baseados na NDS (AWC, 2015), os mais distantes. A norma brasileira foi a única que apresentou resultado atípico na relação entre a resistência da madeira natural e tratada, obtendo valores menores para a resistência final da madeira natural.

- Todos os resultados analíticos se apresentaram a favor da segurança, uma vez que apresentaram valores inferiores aos experimentais para o mesmo modo de falha observado.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apresentam-se como recomendações para trabalhos futuros:

- Caracterização e comparação entre madeira com e sem preservativo para outras espécies de madeira;
- Ensaio de ligação com outros arranjos de ligação comparando resistências da ligação em madeira natural e tratada;
- Cálculo da resistência da ligação pregada pela EUROCODE 5 (CEN, 2004) considerando o efeito de corda;
- Cálculo da resistência da ligação pregada baseando-se na NBR 7190 (ABNT, 1997) com outras espécies de madeira e arranjos de ligação.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D.H. **Análise das resistências de embutimento e de compressão para madeiras de pinus e eucalipto**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Estadual de São Paulo. Itapeva, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/117985>>. Acesso em: 23 mar. 2017.

ALMEIDA, D.H.; FERRO, F.S.; VARANDA, L.D.; CHRISTOFORO, A.L.; LAHR, F.A.R.; MOLINA, J.C.; CALIL JUNIOR, C. Comparação entre valores de ensaios experimentais e calculados da resistência ao embutimento da madeira de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.2, p. 347-352, 2014. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-67622014000200015](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622014000200015)>. Acesso em: 27 mar. 2017.

ALVES, R.C.; OLIVEIRA, A.L.C.; CARRASCO, E.V.M. Propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus cloeziana* F. Mueel. **Revista Floresta e Ambiente** 2017; 24: e00015312. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/floram/v24/2179-8087-floram-2179-8087015312.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2017.

AMERICAN WOOD COUNCIL. NDS - “National Design Specification for Wood Construction”. Leesburg, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6627: Pregos comuns e arestas de aço para madeiras**. Rio de Janeiro, 1981

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

BACHA, C.J.C. Análise da evolução do reflorestamento no Brasil. **Rev. de Economia Agrícola**, São Paulo, v. 55, n. 2, p. 5-24, jul./dez. 2008. Disponível em: <[http://ciflorestas.com.br/arquivos/doc\\_analise\\_brasil\\_5987.pdf](http://ciflorestas.com.br/arquivos/doc_analise_brasil_5987.pdf)>. Acesso em: 5 mar. 2017.

BAENA, J.S. **Comparação dos critérios de dimensionamento de ligações por pinos metálicos (parafusos) em estruturas de madeira**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-21122015-105438/pt-br.php>>. Acesso em: 13 abr. 2017.

BATISTA, D.C.; KLITZKE, R.J.; SANTOS, C.V.T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Revista Ciência Florestal**,



Santa Maria, v.20, n.4, p.665-674, out.-dez., 2010. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/2425/1488>>. Acesso em: 17 set. 2017.

BAZANI, J.H.; GONÇALVES, J.L.M.; ROCHA, J.H.T.; MELO, E.S.A.; PRIETRO, M. Nutrição fosfatada em plantações de eucalipto. **Revista Informações Agrônômicas**, International Plant Nutrition Institute, n. 148, dezembro/2014. Disponível em: <[http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/642B9B97BDFBC80C83257DB600698A31/\\$FILE/Page1-11-148.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/642B9B97BDFBC80C83257DB600698A31/$FILE/Page1-11-148.pdf)>. Acesso em: 13 abr. 2017.

BRANCO, J.M.; CRUZ, P.J. **Lajes mistas de madeira-betão**. Departamento de Engenharia civil da Universidade do Minho. Portugal, 2002.

BRITO, L.D.; CALIL JUNIOR, C. **Manual de projeto e construções de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v.12, n.56, p.57-77, 2010. Disponível em: <<http://www.set.eesc.usp.br/portal/pt/livros/371-manual-de-projeto-e-construcao-de-estruturas-com-pecas-rolicas-de-madeira-de-reflorestamento>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BROCCO, V.F.; LOIOLA, P.L.; PAES, J.B.; OLIVEIRA, J.T.S. Efeito do tempo e pressão de tratamento nas propriedades mecânicas das madeiras de eucalipto. **Revista Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.8, n.15, p.777, 2012. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2012b/ciencias%20agrarias/efeito%20do%20tempo.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

CALIL JUNIOR, C. **SET 406 - ESTRUTURAS DE MADEIRA**. Notas de aula. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003. Disponível em: <<http://www.set.eesc.usp.br/portal/pt/livros/357-dimensionamento-de-elementos-estruturais-de-madeira>>. Acesso em: 5 mai. 2017.

CALIL JUNIOR, C. **Manual de projeto e construção de pontes de madeira**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006. Disponível em: <<http://www.usp.br/agen/wp-content/uploads/Manual-de-Pontes-de-Madeira.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2017.

CALIL NETO, C. **Ligação com parafusos auto-atarraxantes sem pré-furação para uso em estruturas de madeira**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-14052014-110108/pt-br.php>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

CARVALHO, A. **Madeiras portuguesas – Estrutura anatômica, propriedades, utilizações**. V.I. Instituto Florestal, 1996.

CARVALHO, D.E.; SANTINI, E.J.; VIVIAN, M.A.; FREITAS, D.L.; AZAMBUJA, R.R. Variação dimensional da madeira tratada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. **Revista Scientia Agraria Paranensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 14, n. 3, jul./set., p. 178-182, 2015 – ISSN 1983-1471. Disponível em: <<http://e-revista.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/9439>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

DEMARZO, M.A.; PORTO, A.L.G. Indicadores de Sustentabilidade (LCA) e Análise do Ciclo de Vida para Madeira de Reflorestamento na Construção Civil. **Revista Madeira Arquitetura & Engenharia**, n.21, ano 8, Jul./Dez., 2007 – ISSN 1806-6097. Disponível em: <<http://madeira.set.eesc.usp.br/article/viewFile/204/pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2017.

DONADON, B.F. **Estudo de vigas de madeira de reflorestamento laminadas coladas reforçadas por fibras**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2016.

EN 1995-1-1 (2004) **Eurocode 5: Design of timber structures** – part 1-1: *General common rules and rules for buildings*, CEN, Brussels.

EN 1995-1-2 (2004) **Eurocode 5: Design of timber structures** – part 1-2: *General – Structural fire design*, CEN, Brussels.

EN 26891 (1991) – **Timber structures** – *Joints made with mechanical fasteners – General principles for the determination of strength and deformation characteristics*, CEN, Brussels.

ELEOTÉRIO, J.R.; REICHERT, D.; HORNBERG, K.F.; MENEGUELLI, I. Massa específica e retratibilidade da madeira de seis espécies de eucalipto cultivadas no litoral de Santa Catarina. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 45, n.2, p. 329-336, abr./jun.2015. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/34699>>. Acesso em: 13 abr. 2017.

FARIA, W.S.; RESENDE, D.R.; GUIMARÃES, I.L.; PROTÁSIO, T.P.; GUIMARÃES JUNIOR, J.B. Avaliação das propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* tratado e não tratados com preservativo. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.11 n.21; p.287, 2015. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2015b/agrarias/avaliacao%20das%20propriedades%20fisico.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

FOELKEL, C. **Qualidade da madeira do eucalipto: reflexões acerca da utilização da densidade básica como indicador de qualidade da madeira no setor de base florestal**. Eucalyptus Online Book & Newsletter. 2015. Disponível em: <[http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT41\\_Densidade\\_Basica\\_Madeira.pdf](http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT41_Densidade_Basica_Madeira.pdf)>. Acesso em: 16 set. 2017.

GOÉS, J.L.N.; SILVA JUNIOR, J. Avaliação Experimental da resistência de ligações em madeira com parafusos passantes. II CONGRESO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADERA. **Anais...** Buenos Aires. 2017. Disponível em: <<http://clem-cimad2017.unnoba.edu.ar/papers/T6-33.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2017.

HILL, C. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. John Wiley & Sons Ltd. British, 2006. p. 239. Disponível em: <<http://aussiedistiller.com.au/books/Wood%20Modification%20-%20Chemical%20Thermal%20and%20Other%20Processes%20-%20C.%20Hill%20%28Wiley%202006%29%20BBS.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2017.

LAHTELA, V. HAMALAINEN, K., KARKI, TIMO. **The effects of preservatives on the properties of wood after modification (review paper)**. Lappeenranta University of Technology. Lappeenranta, Finland. 2014. Disponível em: <[https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF\\_Articles/2014-20\[1\]/The%20Effects%20of%20Preservatives%20on%20th%20Properties%20of%20Wood\[Review\].pdf](https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2014-20[1]/The%20Effects%20of%20Preservatives%20on%20th%20Properties%20of%20Wood[Review].pdf)>. Acesso em: 20 mar. 2017.

LUCAS FILHO, F.C. Efeito combinado do teor de umidade e da massa específica na resistência e rigidez da madeira de *Pinus elliottii*. **FLORESTA**, Curitiba, v.42, n.3, p.519-526, jul./set.2012. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/16973>>. Acesso em: 18 set. 2017.

MAIA, B.B. **Resistência de ligações pregadas em madeira**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016. Disponível em: <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6866/1/CM\\_COECI\\_2016\\_1\\_06.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6866/1/CM_COECI_2016_1_06.pdf)>. Acesso em: 18 set. 2017.

MIOTTO, J.L.; DIAS, A.A. Reforço e recuperação de estruturas de madeira. Seminário de Ciências Exatas e Tecnológicas. **Anais...** Londrina, v.27, n.2, p.163-174, jul./dez.2006. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/view/1875>>. Acesso em: 4 abr. 2017.

MORESCHI, J.C.; **Métodos de tratamento da madeira.** Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR. Biodegradação e preservação da madeira, 4ª edição, abril/2013. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasmoreschi/METODOS%20DE%20TRATAMENTO.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

RECCO, E.G.; PLETZ, E.; MOURA, J.D.M. Análise experimental de emendas tracionadas de barras de madeira laminada pregada de *Pinus spp.* XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Maceió, 2014.

OLIVEIRA, J.T.S.; TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N.C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, vol. 34, n. 5, Viçosa, Set./Out.2010. Disponível em: <<http://www.producao.usp.br/handle/BDPI/4872>>. Acesso em: 17 set. 2017.

PINHEIRO, R.B. **Influência da preservação contra a demanda biológica em propriedades de resistência e de elasticidade da madeira.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-04042016-161837/fr.php>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

SILVA, J.P.A.G. **Especificações de tratamentos de preservação para elementos de madeira.** Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. Portugal, 2008. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/60291/2/Texto%20integral.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

SILVA, P.A.R.; MORAES, P.D.; RODRIGUES, J.P.C. Ligações pregadas sob temperaturas elevadas. 2ª JORNADA DE SEGURANÇA AOS INCÊNDIOS URBANOS. UNIVERSIDADE DE COIMBRA. **Anais...** Portugal, 2011. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Joao\\_Paulo\\_Rodrigues3/publication/261531868\\_LIGACOES\\_PREGADAS\\_SOB\\_TEMPERATURAS\\_ELEVADAS/links/0c960534818b547670000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Joao_Paulo_Rodrigues3/publication/261531868_LIGACOES_PREGADAS_SOB_TEMPERATURAS_ELEVADAS/links/0c960534818b547670000000.pdf)>. Acesso em: 20 mar. 2017.

SOARES, N.S. **Potencial de implantação de um contrato futuro da madeira de reflorestamento.** Tese de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2006.

Disponível em: <<http://www.http://locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3050/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

SOUZA, T.S.; VITO, M. **Análise comparativa das propriedades mecânicas da madeira tratada e madeira natural**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, 2015. Disponível em: <<http://www.repositorio.unesc.net/handle/1/3016>>. Acesso em: 17 set. 2017.

STAMATO, G.C. **Ligações em estruturas de madeira composta por chapas de madeira compensada**. Dissertação de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-03062016-100611/pt-br.php>>. Acesso em: 12 set. 2017.

VALVERDE, S.R.; SOARES, N.S.; SILVA, M.L.; JACOVINE, L.A.G.; NEIVA, S.A. O comportamento do mercado da madeira de eucalipto no Brasil. **Revista Biomassa e Energia**, v.1, n.4, p. 393-403, 2004. Disponível em: <[http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc\\_o\\_brasil\\_22470.pdf](http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc_o_brasil_22470.pdf)>. Acesso em: 7 abr. 2017.

VITAL, M.H.F. Impacto Ambiental de Florestas de Eucalipto. **Revista do BNDS**, Rio de Janeiro v.14, n. 28, p. 235-276, dez. 2007. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev2808.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev2808.pdf)>. Acesso em: 13 abr. 2017.

VIVIAN, M.A.; SANTINI, E.J.; MODES, K.S.; MORAIS, W.W.C. Qualidade do tratamento preservativo em autoclave para a madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 445-453, dez. 2012. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr96/cap02.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

XAVIER, C.N.; NASCIMENTO, A M.; NASCIMENTO, L.A.C.; SILVA, M.A. Efeito do teor de umidade e da direção de carregamento na resistência de ligações pregadas em madeiras de reflorestamento. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**. Pelotas, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/cienciadamadeira/article/view/6867/cienciadamadeirav7n1a7>>. Acesso em: 28 abr. 2017.