



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

ISABEL SILVEIRA CAMARGO

**TRATAMENTO TÉRMICO E SEU EFEITO NA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES
PREGADAS EM MADEIRA DE *Pinus***

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JUNHO – 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

ISABEL SILVEIRA CAMARGO

**TRATAMENTO TÉRMICO E SEU EFEITO NA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES
PREGADAS EM MADEIRA DE *Pinus***

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JUNHO – 2018

**TRATAMENTO TÉRMICO E SEU EFEITO NA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES
PREGADAS EM MADEIRA DE *Pinus***

ISABEL SILVEIRA CAMARGO

Monografia aprovada em 04 de junho de 2018.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Miguel do Nascimento – UFRRJ
Orientador

Prof. Dra. Gilmara Pires de Moura Palermo - UFRRJ
Membro

Eng. Florestal Fagner Pinheiro da Conceição
Membro

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus avôs,
Délio e Sérgio, *in memoriam*.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois, sem Ele, eu nada posso fazer.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela experiência grandiosa que tive durante esses cinco anos de graduação.

A FAPERJ, instituição fomentadora desta pesquisa.

Ao meu professor e orientador Alexandre Miguel do Nascimento, por todo aprendizado dentro e fora de sala de aula, pela paciência, pela confiança em mim e pelo bom humor.

Aos membros da banca, professora Gilmara Palermo e o amigo Fagner Pinheiro, por terem aceitado o convite para contribuir com esta monografia.

Aos meus pais, Ana Lúcia Silveira e Sergio Trabali Camargo Filho, não apenas por sempre me incentivarem a estudar, mas por todo amor, carinho, dedicação e motivação que deram a mim durante todos esses anos. Tudo de bom que eu faço é para vocês. Gratidão.

Ao meu irmão Sergio Trabali Camargo Neto, pela amizade, conselhos e por me ensinar a conviver com pessoas que são muito diferentes de mim.

Ao Lucas Félix, por todas as palavras de otimismo durante a graduação e a confecção dessa monografia. Obrigada por aturar meu mau humor e minhas inseguranças durante esse último período e por sempre conseguir me acalmar.

Aos meus primos, por me proporcionarem ótimos momentos e por sempre torcerem por mim, são eles: Fábio Reis, Gabriela Camargo, Gabriela Reis, Marcela Reis, Marianna Silveira e Stella Silveira.

Às minhas queridas avós, Clara Herminia Camargo e Olívia Silveira, por serem um exemplo de fortaleza para mim.

Aos meus queridos amigos: os “floresteiros”, que há quase cinco anos dividem experiências alegres e tristes dessa “louca” vida acadêmica comigo, são eles: Carolina Barroco, Dayanne Prado, Fernanda Pinheiro, Julyana Gomes, Karine Veiga, Marcos Gonzaga, Nathália Lima e Thasso Souza; e aos da vida, que foram verdadeiros refúgios quando eu precisei, são eles: Caroline Melo, Flavis Johann, Gabriel Wilwerth e Juliana Poiars.

“Se você é um carpinteiro e está fazendo um belo armário de gavetas, você não vai usar um pedaço de compensado na parte de trás porque as pessoas não o enxergarão, pois ele estará virado para a parede. Você sabe que está lá e, então, usará um pedaço de madeira bonito ali. Para você dormir bem à noite, a qualidade deve ser levada até o fim. ”

Steve Jobs

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da direção de carregamento (paralelo e perpendicular às fibras), do teor de umidade (70% e 88% de teor de umidade relativa do ar-UR) e do tratamento térmico (tratado e não tratado termicamente) na resistência da ligação pregada na madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea*. A madeira foi oriunda de árvores com aproximadamente 25 anos de idade. Todos os ensaios foram realizados segundo a norma brasileira vigente para estruturas de madeira: a NBR 7190 (ABNT, 1997). Para tal, foram realizados ensaios de determinação da carga limite e da resistência experimental para cada direção de carregamento, tratamento da madeira e condição de climatização. Para aferição e ajuste, foi determinado o teor de umidade de cada corpo de prova. Uma vez que a resistência mecânica é dependente da densidade, a mesma foi determinada. Os resultados demonstraram que o efeito da direção de carregamento e a umidade relativa do ar foram significativos. Valores de resistência da ligação pregada foram superiores na condição do ambiente com UR igual a 70%. Houve redução da resistência da ligação quando a madeira foi carregada na direção perpendicular às fibras. O efeito do tratamento térmico não foi significativo, apesar de aumento da resistência na madeira tratada termicamente. O tratamento térmico reduziu a umidade de equilíbrio da madeira, em média, 4,7 e 7,4 pontos percentuais, quando exposta à umidade relativa do ar igual a 70% e 88%, respectivamente. A variação percentual da resistência para cada percentual de variação de umidade da madeira oscilou entre 4 e 10%, valores superiores ao estipulado pela NBR 7190 (ABNT, 1997). O fator de segurança da ligação pregada foi confiável.

Palavras-chave: ligações estruturais, madeira de reflorestamento, embutimento.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the influence of both loading direction (parallel and perpendicular to fibers), moisture content (70% and 88% relative humidity) and heat treatment (treated and untreated) in the resistance of nailed connections in *Pinus caribaea* var. *caribaea*. The wood samples were cut from trees of *Pinus caribaea* var. *caribaea*, with approximately 25 years old. All tests were performed according to current Brazilian standard for wood structures: NBR 7190 (ABNT, 1997). Tests were realized to determine the limit load and the experimental resistance for each loading direction, wood treatment and acclimatization condition. For calibration and adjustment, the moisture content of each test specimen was determined. Since the mechanical strength is density dependent, it has been determined. Results showed that the effect of loading direction and the relative air humidity content were significant. Strength values of the nailed connections were higher in the condition of relative humidity equal to 70%. There was a reduction of the resistance when wood was loaded in a perpendicular direction to the fibers. The effect of the heat treatment was not significant, despite the increase of the resistance in the thermally treated wood. The heat treatment reduced the equilibrium moisture content of wood by 4.7 and 7.4 percentage points when exposed to relative humidity of 70% and 88%, respectively. The percentage variation of the resistance for each percentage of wood moisture variation varied between 4 and 10%, higher values than stipulated by NBR 7190 (ABNT, 1997). The safety factor of the nailed connection was reliable.

Keywords: structural connections, reforested wood, embedment.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Panorama Atual da Madeira.....	2
2.2. Características Gerais da Espécie <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i>	2
2.3. Teor de Umidade.....	3
2.4. Tratamento Térmico da Madeira.....	3
2.5. Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira	4
2.6. Ligações com Pinos Metálicos	5
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	6
3.1. Obtenção, armazenamento e seleção do material utilizado.....	6
3.2. Processamento e tratamento térmico da madeira	7
3.3. Climatização.....	8
3.4. Manufatura dos corpos de prova	8
3.5. Procedimento do teste de ligações	14
3.5.1. Determinação da carga limite	14
3.5.2. Determinação da resistência da ligação	15
3.6. Determinação da umidade.....	17
3.7. Correção da umidade	18
3.8. Determinação da densidade.....	19
3.9. Correção da densidade	19
3.10. Resistências de cálculo ou $R_{dteórico}$ segundo a NBR 7190	19
3.11. Análise estatística.....	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	20
4.1. Avaliação da umidade e densidade aparente.....	20
4.2. Resultados das propriedades mecânicas da madeira de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i>	21
4.3. Resultados das estimativas das resistências das ligações pregadas	22
4.4. Resultados dos testes de ligações pregadas	25
4.4.1. Resultados das cargas limites	25
4.4.2. Resultados das avaliações das ligações.....	26
5. CONCLUSÃO.....	35
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
7. ANEXO.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Delineamento experimental das ligações pregadas, sob influência da direção de carregamento, da umidade e do tratamento térmico.....	8
Tabela 2. Teores de umidade médios para madeira tratada e não tratada, após exposta a diferentes umidades relativa do ar, para madeira de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i>	20
Tabela 3. Densidade aparente média da madeira de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> para todos os tratamentos e a razão entre eles.....	21
Tabela 4. Valores médios das propriedades físicas e mecânicas de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> obtidos experimentalmente.	22
Tabela 5. Valores de cálculo para verificação do tipo de esforço do pino metálico.	24
Tabela 6. Resistências experimentais corrigidas das ligações pregadas.	29
Tabela 7. Valores percentuais obtidos para variação da resistência em decorrência da variação de umidade.....	30
Tabela 8. Fator de segurança das ligações pregadas.	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pregos utilizados. À esquerda: belga; à direita: Gerdau.	6
Figura 2. Tratamento térmico.....	7
Figura 3. Processamento da madeira.....	8
Figura 4. Pré-furação da peça com broca de 3,5 mm.	9
Figura 5. Arranjo dos corpos de prova para ensaios de ligação com direção de carregamento paralela às fibras, em centímetros.	10
Figura 6. Arranjo dos corpos-de-prova para ensaios de ligação com direção de carregamento perpendicular às fibras, em centímetros.	10
Figura 7. Cravação dos pregos em uma peça de cobre-juntas com o auxílio do martelo.	11
Figura 8. Processo de montagem (furação) dos corpos de prova: União de uma peça de cobre-juntas e a peça central.....	12
Figura 9. Pré-furação da peça central, demarcada onde os pregos serão inseridos.....	12
Figura 10. Fase final na montagem dos corpos de prova: União do par de cobres-juntas a peça central.	13
Figura 11. Corpos de prova dos tratamentos com direção de carregamento paralela às fibras da madeira.....	14
Figura 12. Corpos de prova dos tratamentos com direção de carregamento perpendicular às fibras da madeira.....	14
Figura 13. Ciclos de carregamento e descarregamento para determinação da carga limite. Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).	15
Figura 14. Corpo de prova centralizado no ensaio da ligação na direção perpendicular às fibras, com as cobre-juntas apoiadas nas extremidades.	16
Figura 15. Diagrama de carregamento para determinação da resistência da ligação.	16
Figura 16. Diagrama força x deformação específica da ligação.	17
Figura 17. Peças mais finas de todos os corpos de prova na estufa, para determinação do teor de umidade.	18
Figura 18. Gráficos de determinação da carga limite para ligação pregada na direção paralela às fibras de madeira.	25
Figura 19. Gráficos de determinação da carga limite para ligação pregada na direção perpendicular às fibras de madeira.	26
Figura 20. Exemplo do diagrama de carregamento para determinação da resistência da ligação pregada em <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i>	26
Figura 21. Gráficos de diagrama carga experimental x deformação específica da ligação pregada na direção paralela às fibras de madeira.	27
Figura 22. Gráficos de diagrama carga experimental x deformação específica da ligação pregada na direção perpendicular às fibras de madeira.	28
Figura 23. Resistência experimental da ligação pregada	31
Figura 24. Resistência experimental da ligação pregada para cada condição de direção de carregamento, umidade relativa do ar e tratamento térmico.	32
Figura 25. Corpos de prova dos tratamentos com direção de carregamento paralela às fibras da madeira, após a realização dos testes mecânicos.	34
Figura 26. Corpos de prova dos tratamentos com direção de carregamento perpendicular às fibras da madeira, após a realização dos testes mecânicos..	34

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material orgânico, sólido, anisotrópico e higroscópico. Além disso, é um material heterogêneo, logo, possui grande variabilidade nas suas propriedades. Essas características lhe conferem algumas vantagens, bem como outras desvantagens em sua utilização. Esse material pode ser empregado em diversas funções; portanto, se faz necessário o estudo aprofundado na tentativa de se esclarecer melhor quais as opções que o material oferece para ser trabalhado (RUBIM, 2006).

Na construção civil, as estruturas de madeira vêm sendo utilizadas de diversas formas em uso temporário, tais como: fôrmas para concreto, andaime e escoramentos. De forma definitiva, é utilizada nas estruturas de cobertura, portas, janelas, nos forros e nos pisos. (REMADE, 2007).

Com a crescente exaustão das florestas naturais para atender as demandas da construção civil, as madeiras de pinus (*Pinus spp.*), geradas em reflorestamento implantado nas regiões Sul e Sudeste, também passaram a suprir a construção habitacional. Então, nos últimos anos, a madeira de *Pinus spp.* têm ganhado um significativo valor nos projetos de arquitetura sustentável, pelo uso da madeira de reflorestamento, que garante sua origem legal e, por ser um produto de fonte renovável, estimula a produção e o manejo sustentável de florestas plantadas no Brasil.

Segundo Pallarolas (2017), para projetos que utilizam a madeira como elemento estrutural, principalmente na construção civil, é necessário ter um conhecimento aprofundado das propriedades físicas e mecânicas da madeira utilizada, uma vez que estas influenciam diretamente no dimensionamento de sua estrutura.

Portanto, para obter êxito no dimensionamento de madeiras e, conseqüentemente, garantir a qualidade das construções com madeira, os estudos das propriedades desse material devem ser considerados para que haja uma base de informações que estejam disponíveis para a execução do projeto estrutural, que deve admitir uma classe de umidade própria, e assim conhecer as propriedades de resistência e rigidez. Os resultados da caracterização das propriedades são determinados pelo método de ensaios segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997). Destas propriedades pode-se citar: a resistência de ligações.

As estruturas de madeira são utilizadas para diversas finalidades estruturais, como edificações, pontes, dentre outros. Então, o estudo das estruturas é importante para garantir a segurança de toda vida humana que está diretamente em contato com este material. Mas, em grandes estruturas de madeira, que demandam a união de duas ou mais peças de madeira, se faz necessário o emprego de ligações nas peças utilizando elementos de ligação, os quais podem ser citados os pinos metálicos, as ligações coladas e as cavilhas. Os pinos metálicos são exemplificados pelos pregos, parafusos e barras de aço.

Garantir a qualidade da ligação nas estruturas de madeira é muito importante para a eficiência de todo o sistema estrutural, uma vez que as ligações representam o ponto crítico das estruturas de madeira e, portanto, demandam estudos experimentais que avaliem o seu comportamento real. A ocorrência de falhas em uma ligação pode colocar em risco toda a edificação.

É inegável que o estudo das ligações com pinos conectores em estruturas de madeira seja, atualmente, de grande interesse no cenário nacional, principalmente ao se levar em consideração a revisão da norma técnica brasileira pertinente ao assunto.

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a resistência de ligações com pinos metálicos, cujo elemento de ligação é o prego, em madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, sob a influência da umidade, da direção de carregamento e do tratamento térmico.

Além disso, objetivou-se averiguar o fator de segurança das ligações pregadas, ao analisar a razão entre os resultados experimentais e as resistências de cálculo estabelecidas pela NBR 7190 (ABNT, 1997). Existe a necessidade de avaliar as diferentes condições da madeira submetida a ligações pregadas para o conhecimento do condicionamento ideal. Com essa informação será possível ter o conhecimento prévio das melhores condições de climatização e tratamento térmico da madeira, bem como criar uma base de dados, a qual elucidará sobre a utilização ideal deste material para cada variação de resistência, influenciada pelas condições externas a qual a madeira foi submetida.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Panorama Atual da Madeira

Atualmente, ainda persiste no Brasil um grande preconceito em relação ao emprego e uso da madeira, ocasionado, em grande parte, pelo recorrente desconhecimento do material e pela falta de projetos específicos e bem elaborados. As construções em madeira são usualmente realizadas por carpinteiros que, por sua vez, no geral, não possuem conhecimento suficiente para projetar, mas apenas para executar. Portanto, as construções de madeira tornam-se vulneráveis aos mais diversos tipos de problemas, o que gera uma mentalidade equivocada sobre o material (GESUALDO, 2003).

Ainda, segundo Meirelles et al. (2007), ao longo da trajetória da madeira no Brasil, os usos de técnicas construtivas inadequadas contribuíram para que as construções em madeira sejam classificadas como sub-habitação e/ou como estrutura que possui pouca durabilidade.

De acordo com Castro (2005), as indústrias que têm a madeira como material base de seus produtos tem-se deparado com grandes desafios, que estão provocando drásticas mudanças. O primeiro grande desafio é a ascendente expansão dos mercados para a “madeira ambientalmente correta”, exemplificado pela crescente força mercadológica dos “selos verdes” em todo o mundo. Outro desafio é a globalização dos mercados consumidores, que gera consequências, como a necessidade de aumento na produtividade e o atendimento a padrões de qualidade cada vez mais exigentes. Este cenário tem incentivado cada vez mais a exploração da madeira de reflorestamento, principalmente das espécies do gênero *Eucalyptus* e *Pinus*.

2.2. Características Gerais da Espécie *Pinus caribaea* var. *caribaea*

A espécie pertence à família das *Pinaceae*, do gênero *Pinus*, da ordem Coniferae, grupo das Gymnospermae. O gênero é composto por plantas lenhosas, geralmente arbóreas, com altura variando de 3 a 50 m. As plantas possuem troco reto, relativamente cilíndrico e copa em formato de cone. Possuem folha em forma de acículas. Sua madeira apresenta massa específica que varia de 400 a 520 kg/m³, a 15% de teor de umidade. A cor da madeira do cerne varia do amarelo-claro ao alaranjado ou castanho-avermelhado. (LIMA et al., 1988).

De acordo com BENDTSEN (1978), foram encontradas densidades de 0,36 g/cm³ para o lenho juvenil de *Pinus caribaea* e 0,68 g/cm³ para o lenho adulto dessa mesma espécie.

Historicamente, o gênero *Pinus* teve grande importância, inclusive, influenciou padrões de colonização em alguns países ocidentais, uma vez que a resina de pinho bruto antigamente era utilizada em navios a vela como material de embalagem e impermeabilização (MOUSSOURIS e REGATO, 1999).

Pinus caribaea é uma espécie de pinheiro que abrange três variedades naturais, denominadas como: *caribaea*, *bahamensis* e *hondurensis*. Elas ocorrem naturalmente em países da América do Norte e Central, tais como: México, Cuba, Bahamas, Belize,

Guatemala, Nicarágua e algumas outras ilhas locais, em altitudes que variam desde o nível do mar até 1.000 m. Conhecidas como "pinheiro tropical", estas árvores se desenvolvem melhor nos climas quentes, onde crescem mais rápido e melhor do que outras espécies, incluindo *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, estes dois últimos se desenvolvem melhor em países cujo clima seja mais ameno, com temperaturas mais suaves, geralmente em países mais ao Norte do continente Americano (PORTAL MADEIRA TOTAL, 2005).

Entre as espécies e variedades de *Pinus* tropicais, o *caribaea* é o que apresenta a melhor forma de fuste, com ramos finos e curtos. Tais características contribuem para a ampla utilização das madeiras de alta qualidade dessas espécies para serraria (FACCIO, 2010).

A espécie *Pinus caribaea* possui rápido crescimento, produz madeira resinosa, além disso, é muito útil na produção de madeira e de papel. É utilizada para diversas finalidades, tais como: carpintaria, aglomerados, laminados, lenha, móveis, cercas, chapas, dormentes, celulose, entre outros produtos (CHUDNOFF, 1984; FRANCIS, 1992; WANG et al., 1999).

2.3. Teor de Umidade

A madeira é um material higroscópico, ou seja, possui a capacidade de absorver umidade da atmosfera ao redor e retê-la em seu interior na forma de água líquida ou de vapor d'água, dependendo de como se encontra o ambiente na qual está inserida (TSOUMIS, 1991).

A determinação do teor de umidade é de grande importância por influenciar diretamente nas propriedades mecânicas da madeira, inclusive nas de resistência. As dimensões da madeira alteram-se com as variações da umidade no intervalo de 0% até o ponto de saturação das fibras (LOGSDON, 2000).

Neste intervalo conhecido como intervalo higroscópico, ao aumentar o teor de umidade de equilíbrio da madeira, as dimensões da mesma também aumentam (inchamento), o que está diretamente associado principalmente à inserção de água nas camadas polimoleculares nos espaços submicroscópicos da parede celular; esse fenômeno resulta em afastamento destas e, conseqüentemente, na mudança das dimensões da madeira. Em contrapartida, ao reduzir o teor de umidade, as dimensões diminuem (retração), devido à retirada da água dos espaços submicroscópicos da parede celular (LONGSDON, 2002; MORESCHI, 2012).

O teor de água, na forma líquida e/ou de vapor d'água presente na madeira age principalmente sobre propriedades físicas e mecânicas da madeira. Além das variações dos teores de umidade promover alterações das dimensões da madeira, que é denominado de retração e inchamento higroscópico, com o aumento da umidade, a resistência da madeira diminui. Além disso, a umidade da madeira também influencia no seu tratamento com fluídos, curvamento, resistência ao ataque de fungos xilófagos, processo de colagem, na fabricação de compensados, aglomerados e processamento mecânico (JANKOWSKY, 1990).

Segundo Kollmann e Cotê Junior (1968), o incremento da resistência da madeira, com o decréscimo no teor de umidade, pode ser considerado um resultado de dois fatores: do fortalecimento e rigidez dos elementos estruturais da madeira e da sua compactação, devido à contração que ocasionada pela perda de água.

2.4. Tratamento Térmico da Madeira

O principal objetivo do tratamento térmico em madeiras é incrementar as propriedades desse material somente com o uso de calor. Dependendo da duração e da temperatura no processo de tratamento térmico, a madeira apresenta melhorias na estabilidade dimensional. Há também a redução no teor da umidade de equilíbrio e melhoria nas propriedades de inchamento (MODES, 2010).

Além disso, o tratamento térmico proporciona menor variação dimensional, o que, por sua vez, agrega valor ao produto comercializado, permitindo a utilização de espécies antes descartadas. Também, a madeira adquire uma cor escura mais atrativa comercialmente. Dessa forma, o tratamento térmico proporciona a obtenção de produtos com maior qualidade no mercado (AWOYEMI e JONES, 2011; BORGES e QUIRINO, 2004; HAKKOU et al., 2006; MOURA e BRITO 2011; PONCSÁK et al., 2009; WINDEISEN et al., 2007).

Tjeersdma e Militz (2005) descrevem que, no processo de tratamento térmico nenhum produto químico é adicionado para a realização do tratamento da madeira.

O tratamento térmico da madeira, também chamado de termorretificação, é realizado através do aquecimento de amostras em faixas de temperatura inferiores à carbonização, ou seja, menores que 280°C, sendo este um processo que proporciona mudanças na estrutura da madeira devido à adição de calor (BORGES e QUIRINO, 2004).

A extensão das alterações nas propriedades da madeira durante o tratamento térmico depende de vários fatores da metodologia utilizada no processo, tais como: espécie da madeira, da porcentagem de umidade, da atmosfera predominante e, também, da temperatura final do tratamento, duração do tratamento térmico. A temperatura proporciona maiores influências do que o tempo nas propriedades da madeira e, acima de 150°C, as alterações nas propriedades físicas e químicas são permanentes (WINDEISEN et al., 2007; YILDIZ et al., 2006).

Neste sentido, observa-se que o tratamento térmico aplicado na secagem provoca alterações benéficas nas propriedades da madeira. Nessas condições, a madeira termicamente tratada pode apresentar alterações de propriedades mecânicas e resistência biológica. Essas alterações são causadas principalmente em função da degradação térmica dos componentes químicos da madeira e também pela mudança de suas estruturas químicas, além de ocorrer alterações na morfologia dos componentes anatômicos (DEL MENEZZI, 2004).

2.5. Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira

Segundo Gonçalves et al. (2009), o aumento do uso da madeira como matéria prima para fins industriais e construtivos só é possível ocorrer através do conhecimento das propriedades da madeira, sejam elas físicas e mecânicas.

De acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997) densidade básica é a massa específica convencional obtida pelo quociente da massa seca pelo volume saturado. A massa seca é obtida mantendo os corpos de prova em estufa a 103°C até atingir peso constante. O volume saturado é obtido imergindo os corpos de prova em água até atingirem peso constante.

De acordo com Oliveira et al. (2005) densidade é reconhecida como um dos parâmetros mais importantes para avaliação da qualidade da madeira, uma vez que é de fácil e simples determinação, bem como pelo fato de estar diretamente relacionada com as demais características da madeira, inclusive com as propriedades mecânicas. A determinação da densidade da madeira é importante, pois influencia diretamente em suas propriedades de resistência.

De acordo com a American Society For Testing Materials (1987) a resistência à compressão paralela é uma importante propriedade mecânica da madeira, pois é variável ao longo da árvore de acordo com a geometria dos anéis de crescimento, que possuem curvatura que variam com a idade e com a proximidade da medula.

Existem outros testes, tal como o ensaio de compressão perpendicular às fibras, em que uma carga é aplicada sobre a fração de madeira para se verificar a resistência máxima que a espécie suportará sem ser danificada (MADY, 2018).

Almeida (1987), a princípio, considerou a resistência da madeira à compressão paralela às fibras como um bom parâmetro para estimar a resistência da ligação. Porém, após a experimentação através de ensaios laboratoriais, observou o embutimento do prego na parede do furo, surgindo, então, no Brasil, o primeiro estudo referente ao embutimento da madeira no Brasil. O mesmo autor define a resistência da madeira ao embutimento como a resistência à ruptura localizada na madeira pela pressão do pino metálico contra a parede do furo.

A NBR 7190 (ABNT, 1997), em seu Anexo B, intitulado “Determinação das propriedades das madeiras para projetos estruturais”, define a resistência ao embutimento (f_{ed}) pela razão entre a força F_e que causa uma deformação específica residual de 0,2% e a área de embutimento do pino $A = t.d$. Para tal, a força que causa a deformação é determinada a partir do diagrama tensão x deformação específica. A mesma norma ainda sugere que na ausência do valor experimental de resistência ao embutimento, pode-se adotá-lo como igual à resistência a compressão paralela às fibras.

2.6. Ligações com Pinos Metálicos

As ligações em estruturas de madeira são definidas como emendas entre dois ou mais elementos de madeira e devem ser considerados como pontos essenciais para o dimensionamento de uma estrutura, sendo nelas as maiores preocupações relacionadas à segurança e integridade da estrutura, uma vez que a ocorrência de falha em ligação pode ocasionar em grande risco para o restante da edificação (CALIL JUNIOR et al, 2003).

Andrade et al (2000) ressaltaram que as ligações são aspectos críticos em um projeto de estruturas de madeira.

Com o advento da tecnologia, novos equipamentos e tipos de ligações têm aparecido no ramo da construção de estruturas com madeira. Esse avanço facilita a substituição das ligações tradicionalmente empregadas (dente, tarugo, chapa, cola) por ligações mecânicas (pregos, parafusos e pinos) sendo utilizadas em diversos sistemas estruturais. Essas ligações mecânicas permitem a construção de nós rígidos ou elementos de rigidez significativamente maior que a dos demais, o que garante uma idealização mais realista do comportamento das ligações (ALMEIDA, 1987).

De acordo com Calil Junior et al. (2003), os pinos metálicos são os elementos conectores mais utilizados na construção civil em madeira, pois são de simples e fácil instalação, além disso, podem ser em inúmeras configurações de instalação. Os pregos e os parafusos são exemplos de pinos metálicos.

Ainda segundo Calil Junior et al. (2003), as ligações por pinos metálicos são as mais utilizadas em construção de estruturas de madeira, uma vez que apresentam grandes vantagens em relação a outros tipos de ligações comumente encontrados. Como grandes vantagens podem-se destacar: grande variedade de modelos, para a sua utilização não é preciso mão-de-obra especializada, baixo custo quando comparado a outros conectores, não apresentam mudanças de propriedades mecânicas nas diversas condições ambientais de utilização.

De acordo com Oliveira e Dias (2005), o comportamento da ligação está relacionado com a espessura da peça de madeira, o diâmetro do pino, a resistência ao embutimento e a tensão de escoamento do pino. Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), a resistência da ligação pode ser de duas maneiras: pela flexão do pino metálico ou pelo embutimento do elemento de ligação na madeira.

Stamato e Calil Júnior (2002) consideraram a resistência de uma ligação de madeira dependente na flexão do pino (cavilhas, parafusos ou pregos) e ao embutimento destes na

madeira, e propuseram o estudo separado dos fenômenos. Consideraram como embutimento, as tensões que surgem do contato entre o pino e a madeira na ligação no momento da penetração, ou durante a atuação de uma força externa quando na atuação solidária dos corpos de madeira.

Almeida (1987) estudou o comportamento de ligações pregadas, analisando os vários fatores que influenciam seu comportamento. Um dos pontos estudados foi o efeito da pré-furação das peças de madeira, onde observou que para a inserção do prego na madeira deve primeiramente ser feita uma pré-furação, principalmente quando a ligação pertencer a estruturas perenes, utilizando broca com diâmetro ligeiramente inferior ao diâmetro do prego. Por esta razão, ao ser inserido, o prego induz uma pressão em toda a parede do furo, provocando um estado múltiplo de tensões, mesmo sem a presença de carregamento na ligação.

Para ligações pregadas, a NBR 7190 (ABNT, 1997) estabelece que a pré-furação da madeira deve ter diâmetro d_0 não maior que o diâmetro d_{ef} do prego, com os valores usuais de $d_0 = 0,85 d_{ef}$ para as coníferas e $d_0 = 0,98 d_{ef}$ para as dicotiledôneas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Obtenção, armazenamento e seleção do material utilizado

O material utilizado na confecção dos corpos de prova foi madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, proveniente de árvores com idade aproximada de 25 anos. As mesmas foram desdobradas em tábuas com espessura entre 30 e 40 mm, largura maior que 100 mm e comprimento variável e em vigas com espessura maior que 40 mm, largura entre 110 e 200 mm e comprimento variável e, então, foram armazenadas no Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira. As tábuas, material menos espesso, foram selecionadas para a confecção de peças mais delgadas, enquanto que as vigas, mais espessas, foram separadas para a confecção de peças mais grossas.

O elemento de ligação, que neste estudo foi o prego, foi adquirido no comércio de materiais de construção em Seropédica – RJ. Foram utilizadas duas marcas distintas: Gerdau e Belga (Figura 1). Os pregos foram adquiridos comercialmente com bitola de 19 x 36 e com as seguintes medidas: 3,9 mm de diâmetro por 86 mm de comprimento. A NBR 7190 (ABNT, 1997) admite diâmetro mínimo de três (3) mm.



Figura 1. Pregos utilizados. À esquerda: belga; à direita: Gerdau.

3.2. Processamento e tratamento térmico da madeira

Depois de selecionadas, as tábuas e as vigas foram conduzidas à Marcenaria do Departamento de Produtos Florestais para serem processadas. Foram cortadas na serra de disco com comprimento final de 70 cm para facilitar o trabalho de corte, aplainamento e desgrosso. Em seguida, foram plainadas e cortadas para que tivessem a largura final de 8 cm. Desse modo, as tábuas e vigas tornaram-se sarrafos e caibros, respectivamente.

Então, o material foi separado e metade foi destinado ao tratamento térmico em Mufla, a 160°C. O tratamento térmico possuiu quatro fases. A primeira fase (fase A) consistiu em um aumento de temperatura até 100°C durante 120 minutos. Na fase B, a temperatura foi incrementando até atingir 160°C, durante 40 minutos. Enquanto que na fase C os sarrafos com espessura média de 30 mm mantiveram a temperatura em 160°C por 109 minutos, para os caibros, com espessura média de 54 mm, a exposição a essa temperatura constante foi de 195 minutos. A última fase (fase D) contemplou o decréscimo da temperatura até a mesma atingir 60°C. Os sarrafos e caibros receberam uma quantidade de impermeabilizante em ambas as extremidades, para evitar rachaduras. Na Figura 2, segue imagens dos sarrafos antes e depois do tratamento térmico.



Figura 2. Tratamento térmico. **A.** Sarrafos antes do tratamento térmico. **B.** Sarrafos depois do tratamento térmico. **C.** Sarrafos dispostos na Mufla antes do tratamento térmico.

Posteriormente, todo o material tratado e não tratado termicamente foi levado ao desempenho e então ao desgrosso até as peças mais delgadas e as mais espessas atingirem a espessura de 2 cm (cobre-juntas) e 4 cm (peça principal), respectivamente. Após essa etapa, o material foi levado até a serra de disco para seccionar as peças com um comprimento final de 17 cm, como ilustrado na Figura 3.

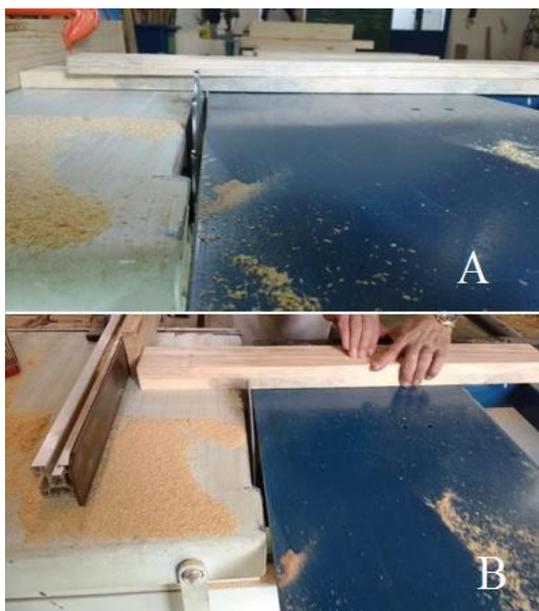


Figura 3. Processamento da madeira. **A.** Sarrafos ao serem confeccionados em peças com comprimento final de 17 cm. **B.** Caibros ao serem confeccionados em peças com comprimento final de 17 cm.

3.3. Climatização

A climatização dos corpos de prova foi realizada em duas condições: em sala climatizada, a uma temperatura média ambiente de 22°C e umidade relativa do ar em torno de 70%, resultando em madeiras com umidade de equilíbrio entre 12 e 13% de umidade nas madeiras não tratadas termicamente e em torno de 8% para madeiras tratadas; e dentro de uma autoclave, com presença de água no fundo da mesma, na mesma temperatura ambiente, porém, com umidade relativa do ar em torno de 88%, ocasionando umidade de equilíbrio variando entre 17 e 20% nas madeiras não tratadas termicamente e em torno de 12% nas madeiras tratadas. Foi realizada uma vaporização dentro da autoclave para que os corpos de prova adquirissem umidade mais rapidamente.

3.4. Manufatura dos corpos de prova

Para este experimento, foram confeccionados 48 corpos de prova. O delineamento está na Tabela 1, seguindo número de repetições exigidos pela NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 1. Delineamento experimental das ligações pregadas, sob influência da direção de carregamento, da umidade e do tratamento térmico.

Delineamento experimental das ligações pregadas				
Direção	Número de amostras para cada tratamento			
	Tratada termicamente		Não tratada termicamente	
	UR = 70%	UR = 88%	UR = 70%	UR = 88%
Paralela	6	6	6	6
Perpendicular	6	6	6	6
TOTAL	12	12	12	12

Em que: UR = umidade relativa do ar.

As peças que compuseram os corpos de prova foram submetidas a uma pré-furação com broca de diâmetro igual a 3,5 mm, em uma furadeira vertical de bancada (Figura 4), uma vez que, em ligações pregadas, a pré-furação da madeira é obrigatória pela NBR 7190 (ABNT, 1997) com diâmetro d_0 não maior que o diâmetro d_{ef} do prego, com os valores usuais para madeiras de coníferas em que $d_0 = 0,85 d_{ef}$, onde d_{ef} é o diâmetro efetivo medido nos pregos a serem inseridos na madeira.



Figura 4. Pré-furação da peça com broca de 3,5 mm.

Para o ensaio das ligações, os corpos de prova foram montados utilizando-se quatro pinos metálicos, compondo-se com três peças de madeira, sendo uma peça principal central e duas outras cobre-juntas. Os pregos foram introduzidos com o auxílio da máquina de ensaio universal Contenco, sendo inseridos em uma única face de cada corpo de prova, atravessando-o totalmente (peça principal central e duas cobre-juntas). Para o ensaio na direção paralela e perpendicular às fibras, a peça principal foi dimensionada com 4 cm de espessura, 8 cm de largura e 17 cm de altura, enquanto que as cobre-juntas foram dimensionadas com 2 cm de espessura, 8 cm de largura e 17 cm de altura.

Os corpos de prova, já montados com as três peças de madeira, com direção de carregamento paralela e perpendicular às fibras atingiram comprimento médio de 19,5 cm e 17 cm, respectivamente.

O espaçamento entre pinos e entre pino e borda da madeira dos corpos de prova em ambas as direções de carregamento seguiram a disposição constante da Figura 5 e Figura 6.

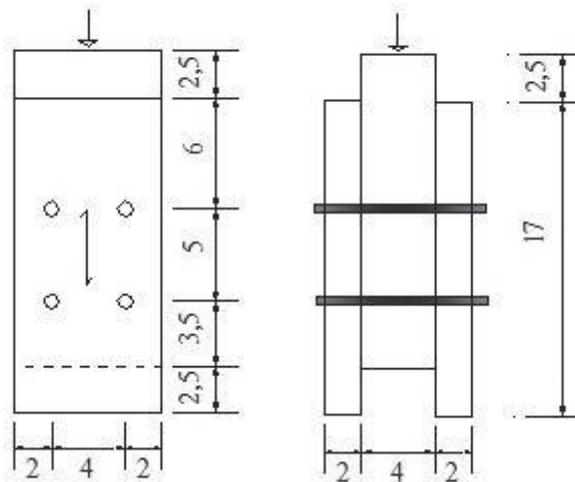


Figura 5. Arranjo dos corpos de prova para ensaios de ligação com direção de carregamento paralela às fibras. Números representam distância em cm.

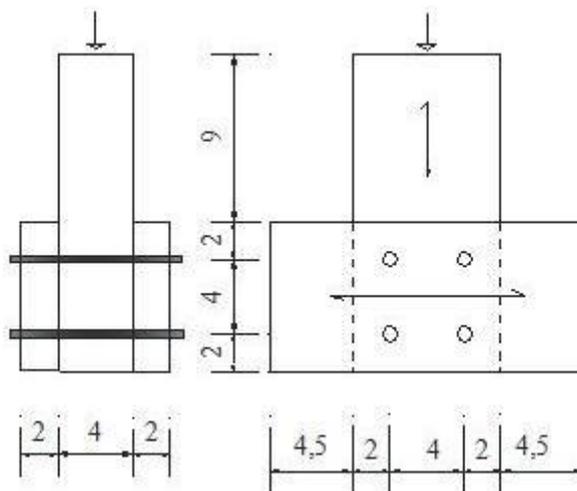


Figura 6. Arranjo dos corpos de prova para ensaios de ligação com direção de carregamento perpendicular às fibras. Números representam distância em cm.

Os corpos de prova, para ensaio de ligação na direção paralela às fibras, foram montados obedecendo às dimensões e espaçamentos mínimos constantes na norma brasileira.

Algumas medidas foram padronizadas acima do mínimo. Na distância entre os centros de dois pinos situados em duas linhas paralelas à direção das fibras, medida perpendicularmente, foi deixada medida padrão de 4 cm em todos os corpos-de-prova, sendo que o estabelecido pela norma é de três vezes o diâmetro do pino (3d). A medida do centro de qualquer pino à borda lateral da peça, medido perpendicularmente às fibras foi padronizada em 2 cm, enquanto que o mínimo recomendado pela norma brasileira é de 1,5 vezes o diâmetro do pino (1,5d). O espaçamento entre o centro de dois pinos situados em uma mesma linha paralela à direção das fibras foi padronizado em 5 cm, enquanto que o mínimo recomendado pela norma, quando o pino utilizado é o prego, é de 6 vezes o diâmetro do pino

(6d). Por fim, a medida do centro do último pino à extremidade de peças comprimidas foi padronizada em 6 cm, enquanto que na norma brasileira o mínimo estabelecido é quatro vezes o diâmetro do pino (4d). Em todos os casos, os valores atendem ao mínimo estabelecido para prego com diâmetro de 3,9 mm.

Vale ressaltar que, as espessuras das peças foram estabelecidas conforme item 8.3.4 da NBR 7190 (ABNT, 1997), sendo utilizada a espessura padrão de 2 cm para as cobre-juntas. As peças centrais foram dimensionadas com o dobro da espessura dos pares decobre-juntas, ou seja, com 4 cm.

Para a montagem dos corpos-de-prova, em um dos pares de cobre-juntas, após receber a pré-furação, foram inseridos os 4 pregos com o auxílio de martelo (Figura 7) até estes estarem bem cravados na madeira.



Figura 7. Cravação dos pregos em uma peça de cobre-juntas com o auxílio do martelo.

Depois, uniu-se um dos pares de cobre-juntas com os pregos inseridos à peça de madeira central em posição pré-definida, respeitando os espaçamentos. Foi utilizada a máquina de ensaio universal Contenco para terminar a inserção dos pregos na cobre-juntas e em parte da peça central, apenas o suficiente para demarcar a região da pré-furação com broca, dando pequenas cargas, aliviando-as de vez em quando, para que os pregos se ajustassem ao buraco obtido na pré-furação da cobre-juntas (Figura 8).

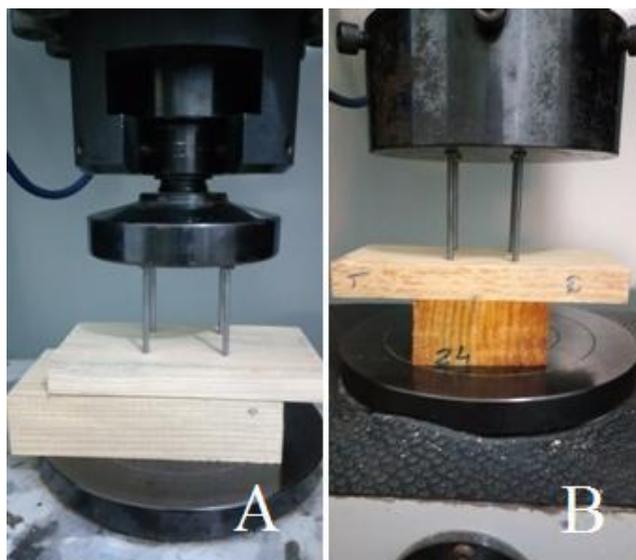


Figura 8. Processo de montagem (furação) dos corpos-de-prova: União de uma peça de cobre-juntas e a peça central **A.** Corpo de prova com direção de carregamento paralelo às fibras. **B.** Corpo de prova com direção perpendicular às fibras.

Então, as peças centrais foram submetidas ao procedimento de pré-furação, em que a broca incidiu exatamente nas 4 demarcações que estiveram em contato com os pregos da peça de cobre-juntas com pregos inseridos (Figura 9).



Figura 9. Pré-furação da peça central, demarcada onde os pregos serão inseridos.

Após a pré-furação das peças centrais, estas eram definitivamente unidas a peça de cobre-juntas com os pregos já inseridos e, com o auxílio da máquina de ensaio universal Contenco, os pregos eram inseridos totalmente nas peças centrais, através o processo de aplicação de pequenas cargas, de forma manual, aliviando a carga de vez em quando para evitar a mudança de direção dos pregos, ao serem inseridos.

Por fim, a peça restante de cobre-juntas era pareada com a primeira, respeitando as distâncias pré-definidas e, com o auxílio de uma pequena carga da máquina de ensaio universal Contenco, este era demarcado na região exata onde, posteriormente, foram realizadas as pré-furações. Após esse último procedimento, a peça restante de cobre-juntas recém furada com broca era acoplada ao restante do corpo de prova e, finalmente, recebia suaves cargas da máquina de ensaio universal Contenco até os pregos atravessarem totalmente toda a extensão do corpo de prova (Figura 10).

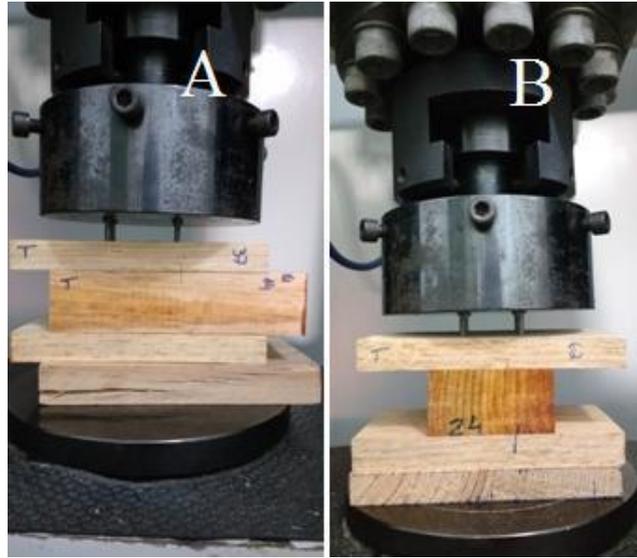


Figura 10. Fase final na montagem dos corpos-de-prova: União do par de cobres-juntas a peça central **A.** Direção de carregamento paralela às fibras. **B.** Direção de carregamento perpendicular às fibras.

Os corpos-de-prova finalizados, para todos os tratamentos, estão dispostos nas Figuras 11 e Figura 12.

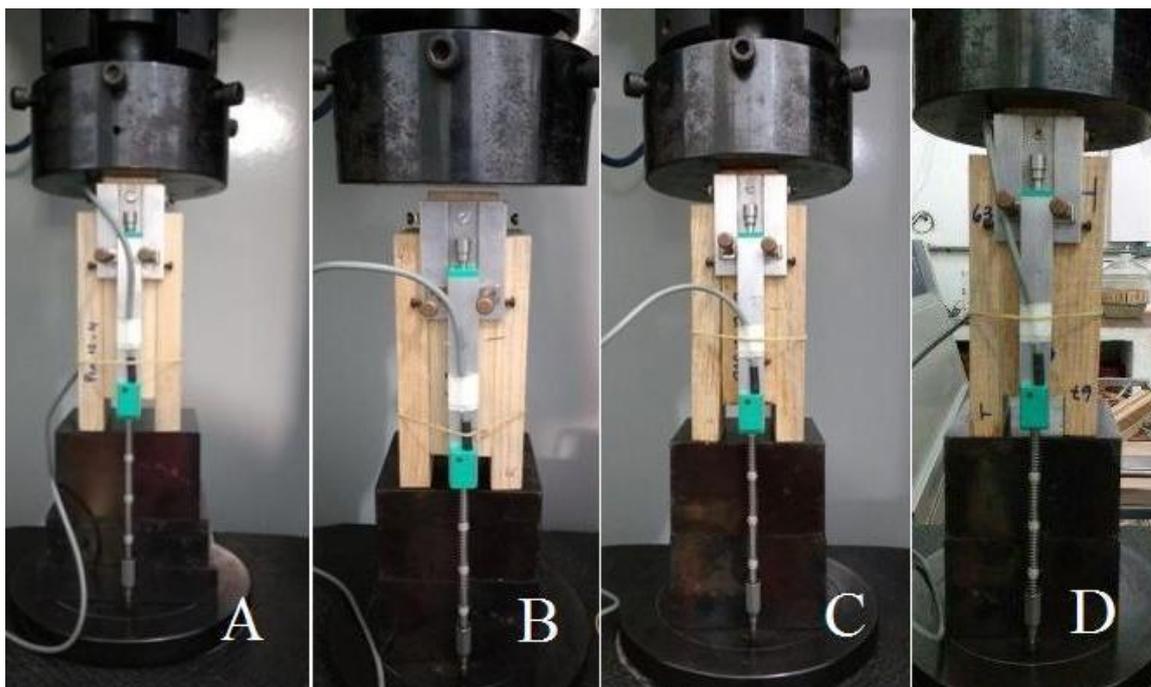


Figura 11. Corpos de prova dos tratamentos com direção de carregamento paralela às fibras da madeira. **A.** Sem tratamento térmico a 70% de umidade relativa do ar. **B.** Sem tratamento térmico a 88% de umidade relativa do ar. **C.** Com tratamento térmico a 70% de umidade. **D.** Com tratamento térmico a 88% de umidade relativa do ar.

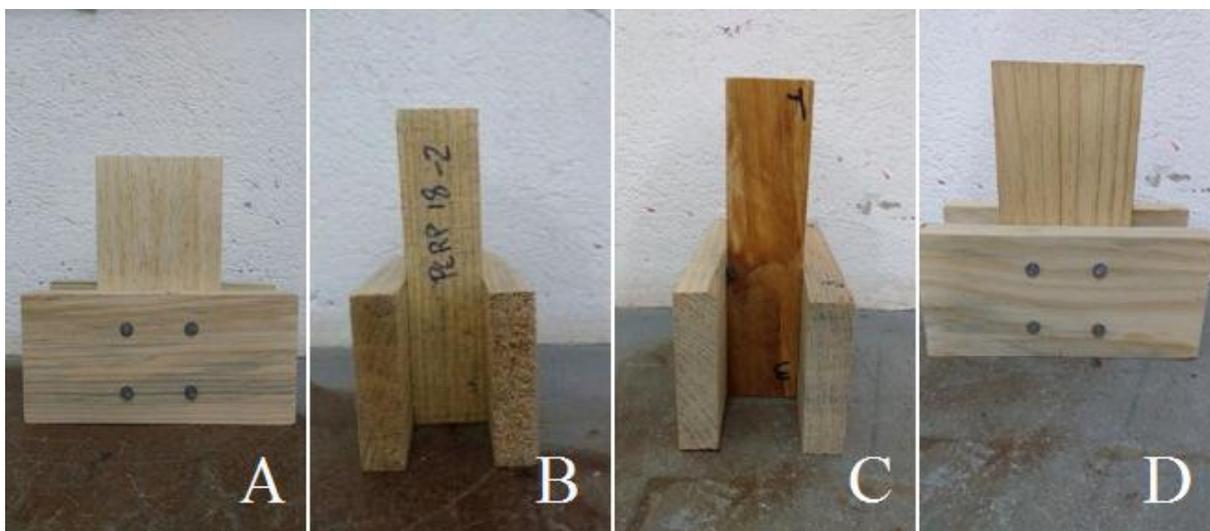


Figura 12. Corpos de prova dos tratamentos com direção de carregamento perpendicular às fibras da madeira. **A.** Sem tratamento térmico a 70% de umidade relativa do ar. **B.** Sem tratamento térmico a 88% de umidade relativa do ar. **C.** Com tratamento térmico a 70% de umidade. **D.** Com tratamento térmico a 88% de umidade relativa do ar.

3.5. Procedimento do teste de ligações

3.5.1 Determinação da carga limite

Os corpos de prova foram ensaiados no Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira, sendo seis (6) corpos de prova para cada tratamento de ligação

pregada. Um dos corpos de prova foi escolhido aleatoriamente para determinação da carga limite da ligação.

Para cada tratamento, o corpo-de-prova foi submetido à compressão. Testado com carregamentos e descarregamentos sucessivos até atingir uma deformação residual de 0,5% de “L₀”. A leitura da deformação teve precisão de 0,01 mm. Os carregamentos foram feitos em ciclos consecutivos, sendo que a cada ciclo a deformação de pico era aumentada em 0,1 mm. Da mesma forma, os descarregamentos também foram estabelecidos por um padrão: cada descarregamento era executado até se observar a leitura de carga igual a 50 kgf. Conforme a Figura 13.

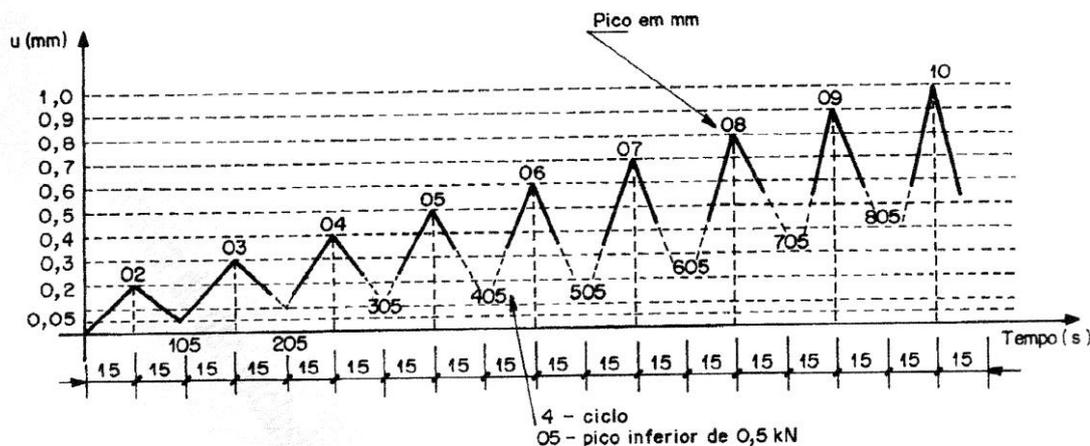


Figura 13. Ciclos de carregamento e descarregamento para determinação da carga limite. Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

A carga observada anteriormente a se atingir à deformação residual de 0,5% de L₀ foi determinada como a carga limite da ligação.

3.5.2. Determinação da resistência da ligação

Determinada a carga limite para cada tratamento, todos os corpos de prova foram ensaiados. Para a realização dos testes mecânicos, foi utilizada uma máquina universal de ensaios, da marca Contenco, no Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira, no Instituto de Floresta, na UFRRJ, com capacidade de 300 kN e para determinação das deformações foi usado o LVDT (*linear variable differential transformer*) e o Stroke para os ensaios nos corpos de prova com direção de carregamento paralela e perpendicular às fibras, respectivamente. O LVDT não foi utilizado nos corpos de prova cuja direção de carregamento foi perpendicular, pois estes possuíam um comprimento menor, logo, o LVDT não podia ser acoplado ao corpo de prova, por isso, foi utilizado o Stroke da máquina de ensaio Contenco. Os ensaios mecânicos seguiram as recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997).

No ensaio da ligação na direção paralela, o carregamento foi aplicado, formando um ângulo de 0° em relação às fibras da peça central e das cobre-juntas. Na direção perpendicular, a força foi aplicada na peça central, formando ângulos de 0° com as fibras desta e 90° com as fibras das cobre-juntas.

Além disso, para o ensaio da ligação na direção perpendicular às fibras, o corpo de prova foi centralizado em relação à aplicação da força, estando as cobre-juntas apoiadas nas extremidades, em uma extensão de 4 cm (Figura 14).



Figura 14. Corpo de prova centralizado no ensaio da ligação na direção perpendicular às fibras, com as cobre-juntas apoiadas nas extremidades.

Os corpos de prova foram ensaiados a semelhança da Figura 15, do diagrama de carregamento. Foram carregados até atingirem 50% da carga limite, permanecendo constante durante 30 segundos, em seguida, foi descarregada até atingir 10% da carga limite, permanecendo constante por mais 30 segundos. Este ciclo foi repetido duas (2) vezes e então havia um terceiro ciclo em que o corpo de prova era carregado até apresentar deformações permanentes.

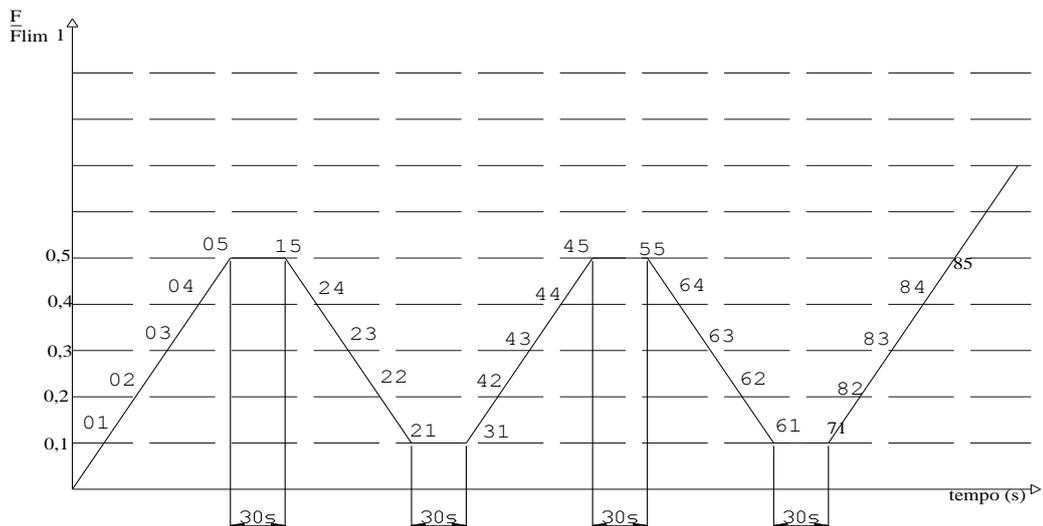


Figura 15. Diagrama de carregamento para determinação da resistência da ligação. Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997)

Com os dados de carga limite foi montado um gráfico, semelhante ao da Figura 16, com valores de força aplicada no eixo das ordenadas, enquanto que no eixo das abscissas foram colocados os valores da deformação específica em relação a L_0 .

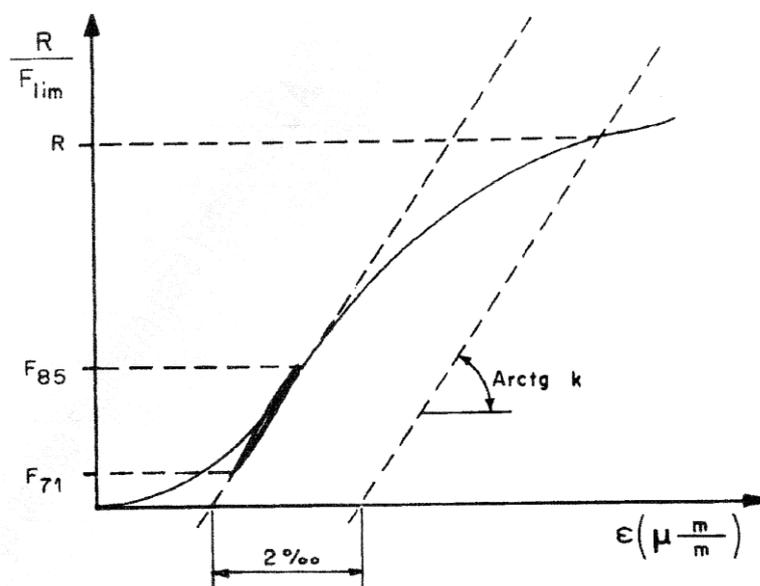


Figura 16. Diagrama carga resistente x deformação específica da ligação. Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

O gráfico acima demonstra o procedimento realizado para a determinação da resistência do corpo de prova. Os valores obtidos de carga e deformação residual foram utilizados para construir esse gráfico. Então uma reta que passa pelos pontos 71 e 85 do gráfico foi traçada até tocar os eixos das abscissas, onde foi observado um valor de deformação residual. Uma reta paralela a essa foi traçada a 0,2% do comprimento de L_0 a partir do ponto observado. Ao tocar a linha da equação formada com os pontos do gráfico foi observada a carga correspondente e então determinada a resistência da ligação para o corpo de prova.

3.6. Determinação da umidade

A umidade foi determinada utilizando-se uma das peças mais finas de cada corpo de prova, com dimensão de 2 x 8 x 17 cm. Depois que todos os corpos de prova foram ensaiados, uma das peças mais finas (cobre-juntas) de cada corpo de prova foi escolhida aleatoriamente e a massa de cada uma delas foi verificada. Depois, foram levadas a estufa a $103\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 17), onde permaneceram até peso constante e, então, determinadas a umidade de cada corpo de prova, através da Equação 1.

$$U_{\%} = \frac{P_i - P_f}{P_f} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: P_i = massa inicial; P_f = massa final; $U_{\%}$ = umidade.



Figura 17. Peças mais finas de todos os corpos de prova na estufa, para determinação do teor de umidade.

3.7. Correção da umidade

Como as propriedades mecânicas da madeira são alteradas de acordo com o teor de umidade, os valores dos dados experimentais foram corrigidos para as umidades de 8, 12 e 18%, de acordo com a Equação 2.

$$\begin{aligned}
 R_8 &= R_{u\%} \left[1 + \frac{\Delta(U\% - 8)}{100} \right] \\
 R_{12} &= R_{u\%} \left[1 + \frac{\Delta(U\% - 12)}{100} \right] \\
 R_{18} &= R_{u\%} \left[1 + \frac{\Delta(U\% - 18)}{100} \right]
 \end{aligned}
 \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: R_8 , R_{12} e R_{18} = resistências da ligação corrigida para 8, 12 e 18% de umidade, respectivamente; $R_{u\%}$ = resistências da ligação na umidade real a ser corrigida; Δ = fator de correção; $U\%$ = umidade real a ser corrigida.

O fator de correção para a resistência da ligação foi obtido a partir da Equação 3.

$$\Delta = \frac{\Delta R}{\Delta Tu}
 \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: Δ = fator de correção; ΔR = variação da resistência; ΔTu = variação do teor de umidade.

O fator de correção (Δ) não foi o mesmo para todas as condições aos quais os corpos de prova foram submetidos, pois foram utilizados os valores experimentais, que variaram conforme a condição a qual a madeira foi exposta (condição do ambiente e tratamento térmico).

3.8. Determinação da densidade

Todas as peças que confeccionaram os corpos de prova, antes de serem acondicionados em suas respectivas condições de tratamento, ou seja, antes de serem tratadas termicamente e/ou inseridas dentro de uma autoclave ou na sala climatizada, tiveram sua massa registrada em balança analítica com precisão de 0,01g e o volume determinado através da medição das dimensões (comprimento x largura x espessura) pelo paquímetro. A densidade aparente foi calculada para todas as peças que confeccionaram todos os corpos de prova, conforme a Equação 4. Posteriormente, foi calculada a média das três peças que confeccionaram cada amostra, para obter a densidade aparente do corpo de prova montado.

$$D_{ap} = \frac{P_{tu}}{V_{tu}} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: D_{ap} = densidade aparente da madeira para um determinado teor de umidade; P_{tu} = peso da peça para um determinado de teor de umidade; V_{tu} = volume da peça para um determinado de teor de umidade.

3.9. Correção da densidade

Para a confecção dos corpos de prova, foi realizada uma análise estatística para averiguar se as três peças (peça central e cobre-juntas) que iriam compor os corpos de prova não tinham diferença significativa de densidade entre si. Porém, essa análise preliminar antes da montagem dos corpos de prova foi realizada apenas para cada corpo de prova de cada tratamento do delineamento experimental, e não entre os lotes de peças separados para tratamento térmico e não tratamento térmico.

Então, os valores de resistência experimental da ligação pregada foram corrigidos pela densidade, pois, após a realização dos ensaios mecânicos, ao analisar a média da densidade nos corpos de prova separados para o tratamento térmico e para o não tratamento térmico, percebeu-se uma diferença significativa, pela estatística, para o efeito do tratamento, uma vez que os corpos de prova com menor densidade foram destinados ao tratamento térmico.

3.10. Resistências de cálculo ou $R_{\text{teórico}}$ segundo a NBR 7190

As ligações têm suas resistências de cálculo estimadas pelo somatório dos números das seções de corte nelas empregados. Foi necessário considerar os valores de β e β_{lim} , calculados pelas Equações 5 e 6, respectivamente:

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (\text{Equação 5}) \quad \beta_{\text{lim}} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que: (f_{ed}) é o valor de resistência ao embutimento; (f_{yd}) é a resistência ao escoamento do pino metálico; d é o diâmetro do elemento de ligação e t é a menor espessura da madeira utilizada. Sendo que: caso $\beta \leq \beta_{\text{lim}}$, a resistência do pino será ao embutimento na madeira; caso $\beta > \beta_{\text{lim}}$, a resistência do pino será à flexão.

Dessa forma, segue abaixo as Equações 7 e 8, para o cálculo da resistência ao esmagamento e à flexão para pinos metálicos, respectivamente:

$$R_d = 0,4 \frac{t^2}{\beta} f_{ed} \text{ (Equação 7) para } \beta \leq \beta_{lim}$$

$$R_d = 0,625 \frac{d_2}{\beta_{lim}} f_{yd} \text{ (Equação 8) para } \beta \geq \beta_{lim}$$

3.11. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas pelo programa STATISTICA[®], em que foram testados os pressupostos da Análise de Variância, que são: normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias. Para a variável dependente, a resistência da ligação devidamente corrigida, foi avaliada sua distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e heterocedasticidade das variâncias pelo teste de Levene, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Após o atendimento dos pressupostos, a análise de variância foi aplicada. Testou-se o efeito da direção de carregamento, do teor de umidade e do tratamento térmico na resistência da ligação, devidamente corrigida pela umidade e densidade. Para comparação entre as médias, foi utilizado o teste de Tuckey, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Avaliação da umidade e densidade aparente

De cada corpo de prova foi extraída uma peça mais fina (cobre-juntas), com 2 cm de espessura, para a verificação do teor de umidade real. Essas peças ficaram 72 horas em estufa com uma temperatura aproximada de 103 °C, até peso constante. Depois de feito os cálculos para a determinação da umidade, os resultados médios foram obtidos e estão na Tabela 2. A umidade real deve ser utilizada para corrigir o valor final da resistência da ligação.

Tabela 2. Teores de umidade médios para madeira tratada e não tratada, após exposta a diferentes umidades relativa do ar, para madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea*.

Direção	Não tratada termicamente		Tratada termicamente	
	UR=70%	UR=88%	UR=70%	UR=88%
Paralela	12,8	18,7	8,4	11,9
Perpendicular	13,0	19,9	8,1	11,9
Média	12,9	19,3	8,2	11,9

Em que: UR = umidade relativa do ar.

Através dos resultados evidenciados pela Tabela 2, é possível notar um decréscimo considerável nos teores de umidade das madeiras tratadas termicamente quando comparadas as madeiras não tratadas termicamente, ainda que a exposição à temperatura do ar e a umidade relativa do ar tenha sido a mesma. Logo, nota-se que o tratamento térmico da madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea* diminui a capacidade higroscópica da mesma. Jankowsky (1985), em um de seus experimentos, utilizando madeira de *Pinus*, também avaliou a variação de umidade de equilíbrio, e observou um comportamento similar ao visto neste estudo, em que a madeira submetida à secagem artificial apresentou menor higroscopicidade do que a madeira apenas exposta ao ambiente.

A densidade aparente média dos corpos de prova para cada tratamento encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3. Densidade aparente média da madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea* para todos os tratamentos e a razão entre eles.

Direção	Densidade aparente média (g/cm ³)			
	NT		T	
	UR = 70%	UR = 88%	UR = 70%	UR = 88%
Paralela	0,560	0,560	0,540	0,540
Perpendicular	0,560	0,550	0,530	0,530
Média	0,560	0,555	0,535	0,535
Média	0,558 ^a		0,535 ^b	

Em que: NT = não tratado termicamente; N = tratado termicamente; UR = umidade relativa do ar. As letras minúsculas comparam as médias de densidade pelo teste Tukey a 5% de significância.

As médias de densidade aparente para o efeito do tratamento térmico são significativas pela estatística. Lotes de peças de madeira com valores com densidade inferiores foram destinadas ao tratamento térmico, enquanto àquelas peças mais densas formaram os corpos de prova que não foram tratados termicamente. A diferença entre as densidades no efeito do tratamento térmico pode ter influenciado nas resistências experimentais e, por esse motivo, a mesma foi corrigida pela densidade.

Os valores de densidade aparente da madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea* são similares aos encontrados por de Castro et al. (2014), que encontrou valor de densidade aparente média de 0,54 g/cm³ para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

4.2 Resultados das propriedades mecânicas da madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea*

Através de outros estudos/projetos conduzidos no Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira, obteve-se os valores médios das principais propriedades físicas e mecânicas da espécie *Pinus caribaea* var. *caribaea* (Tabela 4). Alguns dos valores evidenciados na Tabela 4, tais como: compressão e embutimento, foram essenciais para a obtenção da resistência de cálculo da madeira pregada, que está no item 4.3.

Tabela 4. Valores médios das propriedades físicas e mecânicas de *Pinus caribaea* var. *caribaea* obtidos experimentalmente.

Propriedades Físicas e Mecânicas	Diâmetro pino (mm)	Valores médios	
Densidade básica (g/cm ³)		0,45	
Compressão (kgf/cm ²)	$f_{c0(8\%)}$	448	
	$f_{c0(12\%)}$	400	
	$f_{c0(18\%)}$	320	
	$f_{c90(8\%)}$	112	
	$f_{c90(12\%)}$	100	
	$f_{c90(18\%)}$	80	
	E_c	95.000	
Cisalhamento (kgf/cm ²)		107	
Dureza (kgf/cm ²)	Radial	319	
	Tangencial	286	
	Axial	425	
Flexão (kgf/cm ²)	f_m	740	
	E_m	102.500	
	f_{lp}	450	
Embutimento (kgf)	$*f_{e0(8\%)}$	12	421
	$f_{e0(12\%)}$	12	332
	$f_{e0(18\%)}$	12	232
	$*f_{e90(8\%)}$	7	230
	$f_{e90(12\%)}$	7	179
	$f_{e90(18\%)}$	7	131

Em que: $f_{c0(8\%)}$ = Tensão resistente à compressão na direção paralela às fibras, em madeira com 8% de umidade de equilíbrio; $f_{c0(12\%)}$ = Tensão resistente à compressão na direção paralela às fibras, em madeira com 12% de umidade de equilíbrio; $f_{c0(18\%)}$ = Tensão resistente à compressão na direção paralela às fibras, em madeira com 18% de umidade de equilíbrio; $f_{c90(8\%)}$ = Tensão resistente à compressão na direção perpendicular às fibras, em madeira com 8% de umidade de equilíbrio; $f_{c90(12\%)}$ = Tensão resistente à compressão na direção perpendicular às fibras, em madeira com 12% de umidade de equilíbrio; $f_{c90(18\%)}$ = Tensão resistente à compressão na direção perpendicular às fibras, em madeira com 18% de umidade de equilíbrio; E_c = Rigidez à compressão; f_m = Tensão resistente à flexão; E_m = Rigidez à flexão; f_{lp} = Limite de proporcionalidade na flexão; $f_{e0(8\%)}$ = Tensão resistente ao embutimento na direção paralela às fibras, em madeira com 8% de umidade de equilíbrio; $f_{e0(12\%)}$ = Tensão resistente ao embutimento na direção paralela às fibras, em madeira com 12% de umidade de equilíbrio; $f_{e0(18\%)}$ = Tensão resistente ao embutimento na direção paralela às fibras, em madeira com 18% de umidade de equilíbrio; $f_{e90(8\%)}$ = Tensão resistente ao embutimento na direção perpendicular às fibras, em madeira com 8% de umidade de equilíbrio; $f_{e90(12\%)}$ = Tensão resistente ao embutimento na direção perpendicular às fibras, em madeira com 12% de umidade de equilíbrio; $f_{e90(18\%)}$ = Tensão resistente ao embutimento na direção perpendicular às fibras, em madeira com 18% de umidade de equilíbrio. (*) valores não determinados e sim estimados de madeira tratada, ao usar o fator de correção de Conceição et al. (2017) obtido no estudo de madeiras não tratadas termicamente, em ambas as direções de carregamento.

4.3. Resultados das estimativas das resistências das ligações pregadas

Para a obtenção das estimativas das resistências das ligações pregadas foram usados os seguintes valores: f_{yd} do aço, que é a resistência ao escoamento do pino metálico (5.818 kgf/cm²); f_{ed} da madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea*, obtidos através de Conceição et al. (2017) e que se encontra na Tabela 4; a dimensão da peça de menor espessura (20 mm) e o diâmetro do pino conector (3,9 mm).

Para obter os valores de f_{ed} (resistência de cálculo da madeira ao embutimento) da madeira foi utilizada a Equação 9.

$$f_{ed} = k_{mod1} k_{mod2} k_{mod3} \frac{f_{ek}}{\gamma_c} \quad (\text{Equação 9})$$

Em que: f_{ed} é a resistência de cálculo da madeira ao embutimento; f_{ek} é o valor característico ao embutimento, assumido como $f_{ek} = 0,7f_e$; $\gamma_c = 1,4$.

Para os valores de cálculo das madeiras tratadas termicamente, na direção paralela e perpendicular às fibras de madeira, foi utilizado os valores de embutimento de *Pinus caribaea* var. *caribaea* não tratados, que posteriormente foram corrigidos para a condição de umidade de equilíbrio de 8% e 12% para os corpos de prova climatizados em condição do ambiente com umidade relativa do ar a 70% e 88%, respectivamente. Depois de obtido o valor de embutimento estimado para os corpos de prova tratados termicamente, usou-se para obter os valores de resistência de cálculo os seguintes k_{mod} : $k_{mod1} = 0,9$ (pequeno tempo de carregamento) e $k_{mod3} = 0,8$ (madeira do tipo Conífera). Neste estudo, o k_{mod2} (coeficiente de classe de umidade da madeira) não tem efeito e não é utilizado efetivamente para calcular a resistência de cálculo da madeira ao embutimento, pois os valores reais de resistência ao embutimento para madeira não tratada termicamente já foram obtidos por Conceição et al. (2017), logo, os mesmos são conhecidos, e, para a madeira tratada termicamente, os valores de resistência foram estimados através dos valores não tratados, logo, k_{mod2} foi dispensável.

Vale ressaltar que o diâmetro do pino utilizado por Conceição et al. (2017) nos ensaios de embutimento paralelo foi de 12 mm, pois os ensaios para esta direção de carregamento foram realizados apenas com este diâmetro de pino, enquanto que no embutimento perpendicular foram utilizados três diâmetros de pinos diferentes, sendo escolhido os valores obtidos no pino de 7 mm para realização da correção dos valores para madeiras tratadas, uma vez que este é o diâmetro mais próximo de 3,9 mm, que é o diâmetro do pino utilizado neste estudo de ligações pregadas.

As Equações usadas para calcular as resistências de cálculo das ligações pregadas foram: 5, 6, 7 e 8 do subitem 3.9. Os resultados estão na Tabela 5.

Tabela 5. Valores de cálculo para verificação do tipo de esforço do pino metálico.

Direção	Tratamento	Condição UR	f_{ed} (kgf/cm ²)	t (mm)	β	β_{lim}	R_d	$R_{d(lig)}$
Paralela	NT	70%	120	20	5,13	8,7	37,3	298
		88%	84	20	5,13	10,4	26,1	208
	T	70%	152	20	5,13	7,7	47,3	378
		88%	120	20	5,13	8,7	37,3	298
Perpendicular	NT	70%	64	20	5,13	11,9	20,1	161
		88%	47	20	5,13	13,9	14,7	118
	T	70%	83	20	5,13	10,5	25,8	207
		88%	67	20	5,13	11,8	20,2	162

Em que: NT = Não tratada termicamente; T = Tratada termicamente; UR = Umidade relativa do ar; f_{ed} = valor de resistência ao embutimento; β = Beta; β_{lim} = Beta limite; R_d = Valores de cálculo por seção de corte; $R_{d(lig)}$ = Resistência de cálculo da ligação (todas as 8 seções de corte). Obs.: Nos corpos de prova tratados termicamente, os valores foram estimados para madeira com umidade igual a 8% (UR=70%) e para umidade igual a 12% (UR=88%).

De acordo com a Tabela 5, é possível notar que o prego será exigido quanto ao embutimento na madeira, como descrito no subitem 3.9.

Segue também, na Tabela 5, os resultados de resistência de cálculo das ligações pregadas para todas as condições. Vale ressaltar que, na obtenção dos valores médios estimados de resistência para a condição em que os corpos de prova foram tratados termicamente e posteriormente acondicionados em ambiente com umidade relativa do ar a 70%, o teor de umidade de equilíbrio da madeira era, em média, 8%.

Os valores obtidos quando os corpos de prova foram submetidos à condição do ambiente cuja umidade relativa do ar foi 70% e que não foram tratados termicamente, para direção de carregamento paralela e perpendicular às fibras de madeira foram maiores do que aqueles submetidos a condição do ambiente em que a umidade relativa do ar foi de 88%. Porém, quando os corpos de prova foram tratados termicamente a 160°C, é possível notar que, para a condição ambiente de umidade relativa do ar de 70%, tanto para direção paralela quanto para perpendicular, os valores também foram maiores.

Para todas as condições do ambiente (70% e 88% de umidade relativa do ar) e direções de carregamento (paralela e perpendicular às fibras) os valores foram superiores quando a madeira foi tratada termicamente.

Em relação à direção de carregamento, quando a força foi aplicada de forma paralela às fibras, os valores foram superiores tanto para madeiras tratadas e não tratadas termicamente em ambas as condições do ambiente.

4.4. Resultados dos testes de ligações pregadas

4.4.1. Resultados das cargas limites

A carga limite foi determinada de acordo com o ciclo de carregamento e descarregamento (Figura 13), para cada tratamento da espécie de *Pinus caribaea* var. *caribaea*. A carga limite é a carga necessária para gerar a deformação residual de 5/1000 de L_0 .

Na Figuras 18 e 19, encontram-se os gráficos dos corpos de prova usados para a determinação da carga limite para ligação pregada na direção de carregamento paralela e perpendicular às fibras, respectivamente.

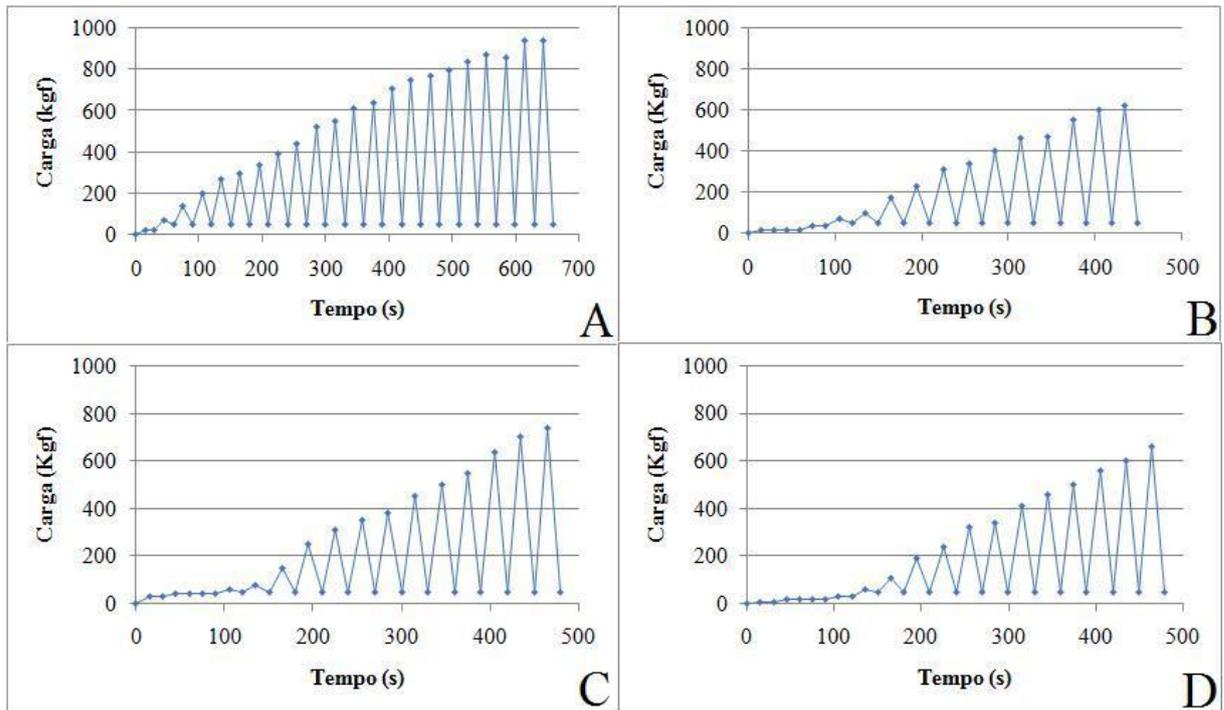


Figura 18. Gráficos de determinação da carga limite para ligação pregada na direção paralela às fibras de madeira. **A.** Com umidade relativa do ar a 70%. **B.** Com umidade relativa do ar a 88%. **C.** Tratada termicamente e a 70% de umidade relativa do ar. **D.** Tratada termicamente e a 88% de umidade relativa do ar.

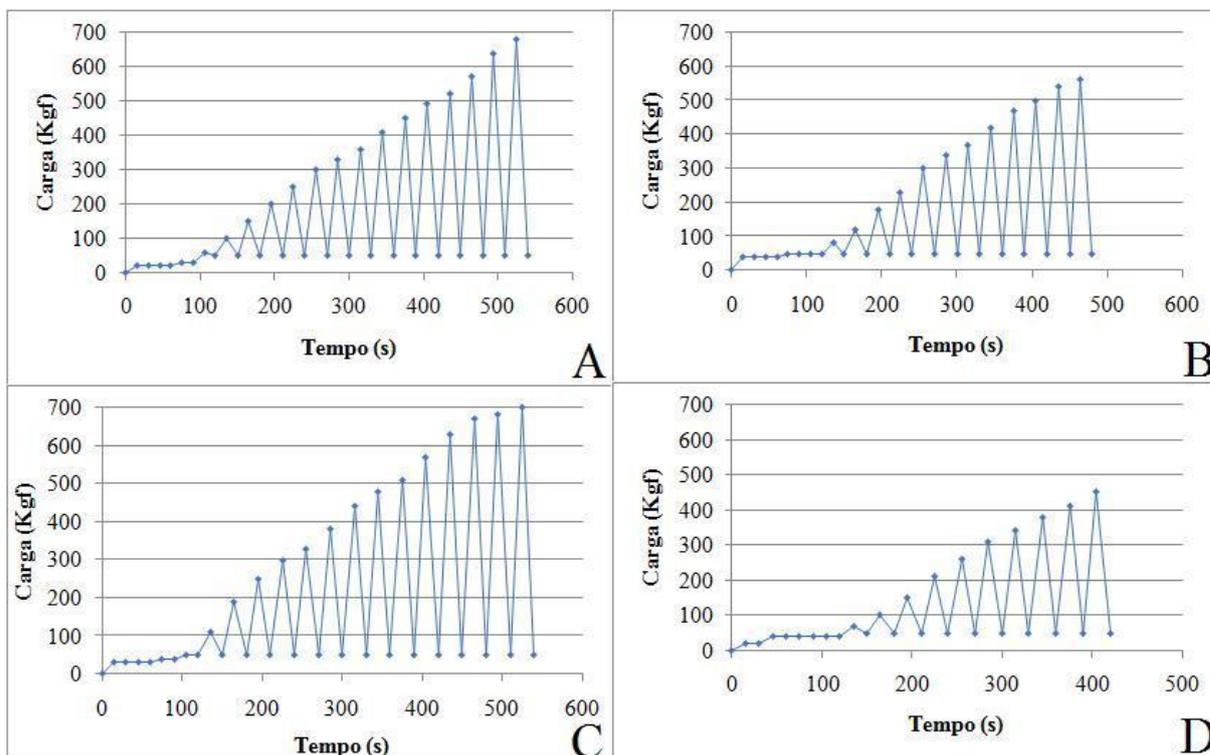


Figura 19. Gráficos de determinação da carga limite para ligação pregada na direção perpendicular às fibras de madeira. **A.** Com umidade relativa do ar a 70%. **B.** Com umidade relativa do ar a 88%. **C.** Tratada termicamente e a 70% de umidade relativa do ar. **D.** Tratada termicamente e a 88% de umidade relativa do ar.

4.4.2. Resultados das avaliações das ligações

Na Figura 20 tem-se o diagrama de carregamento no teste de determinação da resistência da ligação. Neste exemplo, há o corpo de prova denominado “Par 12-2” (direção de carregamento paralela; umidade relativa do ar a 70%; sem tratamento térmico).

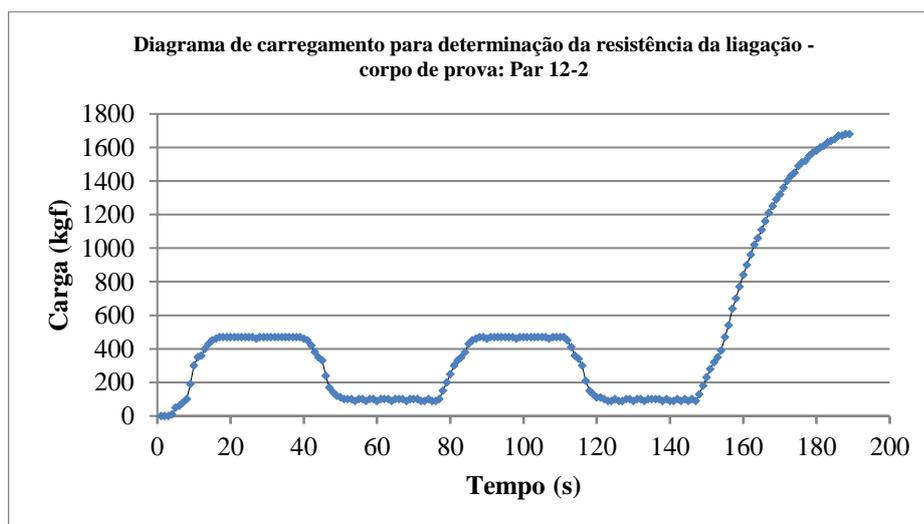


Figura 20. Exemplo do diagrama de carregamento para determinação da resistência da ligação pregada em *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Condição: Ligação paralela às fibras e umidade relativa do ar a 70%; corpo de prova n° 2.

Com posse dos dados de carga e deformação da Figura 20, foram criados gráficos (Figuras 21 e 22) para direção de carregamento paralela e perpendicular às fibras, respectivamente, que relacionam as cargas sofridas com as respectivas deformações específicas (epsolon). Nestas figuras, os valores de x, epsolon, estão multiplicados por 1000 para poder calcular a deformação adicional de 2/1000. O valor de resistência da ligação, no eixo y, é obtido quando a segunda reta (similar a primeira) encontra a curva de carga-deformação.

Tal procedimento foi feito para todos os corpos de prova, para cada direção de carregamento (paralela e perpendicular), teor de umidade relativa do ar (70% e 88%) e tratamento térmico (madeira tratada e não tratada termicamente).

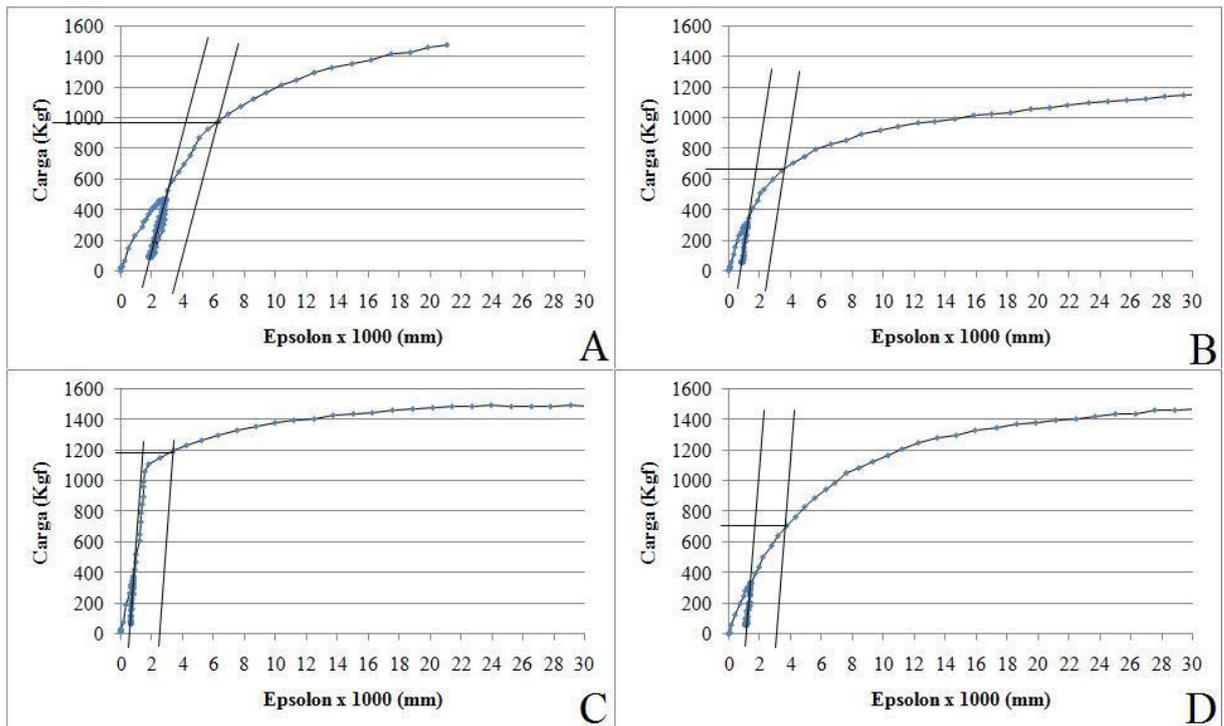


Figura 21. Gráficos de diagrama carga experimental x deformação específica da ligação pregada na direção paralela às fibras de madeira. **A.** Com umidade relativa do ar a 70%. **B.** Com umidade relativa do ar a 88%. **C.** Tratada termicamente e a 70% de umidade relativa do ar. **D.** Tratada termicamente e a 88% de umidade relativa do ar.

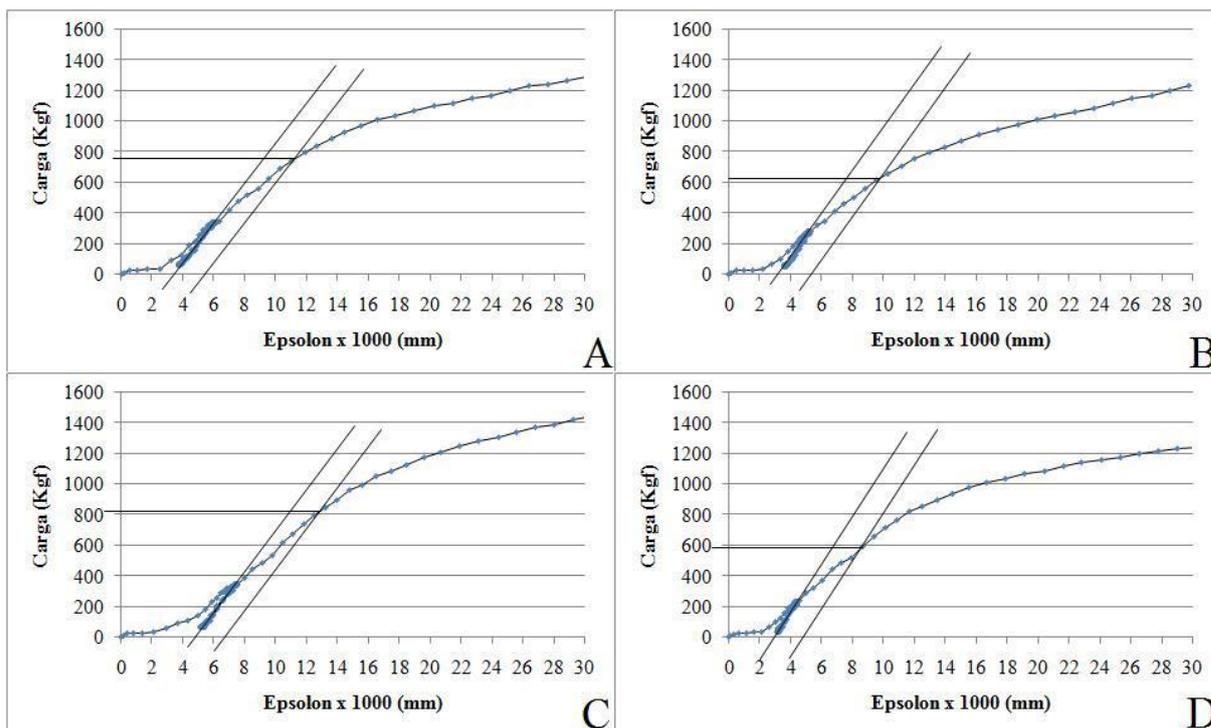


Figura 22. Gráficos de diagrama carga experimental x deformação específica da ligação pregada na direção perpendicular às fibras de madeira. **A.** Com umidade relativa do ar a 70%. **B.** Com umidade relativa do ar a 88%. **C.** Tratada termicamente e a 70% de umidade relativa do ar. **D.** Tratada termicamente e a 88% de umidade relativa do ar.

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados médios das avaliações das resistências experimentais pregadas para todas as condições, devidamente corrigidos para a umidade e densidade, com os respectivos desvios padrões, bem como as razões entre os tratamentos.

As correções para umidade foram necessárias uma vez que os corpos de prova tratados termicamente diminuíram a capacidade higroscópica, logo, na condição do ambiente em que umidade relativa do ar foi de 70% e 88%, respectivamente, precisou-se de correções para umidade de 8% e 12%. Os corpos de prova não tratados termicamente, por sua vez, precisaram de correções para umidade de 12% e 18% quando a condição do ambiente foi 70% e 88%, respectivamente.

Em relação à correção da densidade, esta foi necessária, pois o lote de peças separado para compor os corpos de prova tratados termicamente apresentou valores de densidade inferiores àquele lote destinado para formar os corpos de prova não tratados termicamente (conforme Tabela 3), ainda que tenha sido realizada uma análise estatística para verificar se havia diferença significativa na densidade das peças que iriam compor os corpos de prova, a fim de certificar que os tratamentos possuíssem densidade semelhante, e a mesma ter dado não significativa.

Tabela 6. Resistências experimentais corrigidas das ligações pregadas.

Resistência Experimental – R_{exp} (kgf)				
Direção	Tratamento	Condição do ambiente		
		UR=70%	UR=88%	R_{70}/R_{88} (%)
Paralela	NT	944 ₍₁₀₇₎	715 ₍₇₄₎	32
	T	1.042 ₍₁₉₄₎	749 ₍₁₀₄₎	39
	R_T/R_{NT} (%)	10	5	
Perpendicular	NT	814 ₍₁₂₅₎	653 ₍₄₆₎	25
	T	885 ₍₁₀₈₎	703 ₍₇₇₎	26
	R_T/R_{NT} (%)	9	8	
$(Par/Perp)_{NT}$ (%)		16	9	
$(Par/Perp)_T$ (%)		18	7	

Em que: NT = Não tratada termicamente; T = Tratada termicamente; UR = Umidade relativa do ar; R_T/R_{NT} = Razão entre a média dos valores tratados e dos não tratados termicamente; R_{70}/R_{88} = Razão entre a média dos valores a 70% e 88% de umidade relativa do ar; $(Par/Perp)_{NT}$ = Razão entre a média dos valores da direção paralela e perpendicular não tratados termicamente; $(Par/Perp)_T$ = Razão entre valores da direção paralela e perpendicular tratados termicamente. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

É possível observar, através da Tabela 6, que as resistências experimentais das ligações pregadas apresentaram maiores valores nas seguintes condições: direção de carregamento paralela às fibras de madeira; condição do ambiente com valor de umidade relativa do ar a 70%; e madeira tratada termicamente. Embora as resistências estimadas de cálculo previssem que estas condições seriam as mais resistentes, apenas a direção de carregamento (paralela/perpendicular) e a condição do ambiente (70%/88% de umidade relativa do ar) obtiveram diferença significativa pela análise estatística (Figuras 23 e 24).

Os valores de resistência experimental obtidos em ambas as direções de carregamento para condição do ambiente com 70% de umidade relativa do ar foram superiores, quando comparados a condição do ambiente cuja umidade relativa do ar foi de 88%, como era esperado. Porém, a variação no percentual de resistência para cada variação percentual de umidade, foi superior ao previsto pela NBR 7190 (ABNT, 1997) em todas as condições, uma vez que a norma prevê uma variação de 3% na resistência para cada variação de 1% no teor de umidade de equilíbrio da madeira, enquanto que nas ligações pregadas, a cada 1% de variação de umidade, a resistência variou entre 4% e 10%, conforme Tabela 7. O cálculo foi realizado através da Equação 3, no subitem 3.7.

Tabela 7. Valores percentuais obtidos para variação da resistência em decorrência da variação de umidade.

Direção	Valores de Δ		Tabelado
	Tratamento		
	T	NT	
Paralela	9,8	5,3	3
Perpendicular	6,5	4,2	3
ΔTu	4	6	

Em que: T = Tratado termicamente; NT = não tratado termicamente. Tabelado é o valor de delta estabelecido pela NBR 7190 (ABNT, 1997).

Em relação à direção de carregamento, os valores de resistência experimental foram superiores quando a direção de carregamento foi paralela às fibras, se comparadas com a direção perpendicular, em ambas as condições do ambiente (70% e 88%) e tratamento térmico (tratada e não tratada), conforme o esperado (Figura 23). Porém, a razão foi superior na condição do ambiente cuja umidade relativa do ar foi de 70%, alcançando, em média, valores 17% maiores quando a força foi aplicada na direção paralela às fibras, enquanto que na condição de ambiente com umidade relativa do ar de 88%, a direção de carregamento paralela foi, em média, 8% maior quando comparada a força aplicada perpendicularmente às fibras, evidenciando uma tendência de redução na razão entre as direções de carregamento ao expor a madeira a umidades relativas mais elevadas. Oliveira (2001) também encontrou valores para resistência experimental das ligações pregadas superiores na direção de carregamento paralela às fibras (1,27 kN), utilizando prego de 4,4 cm, quando comparado à direção perpendicular (0,92 kN), em corpos de prova acondicionados em tanque com água até o ponto de saturação das fibras.

O efeito do tratamento térmico não foi significativo pela estatística, porém, os valores de resistência experimental foram de 5% a 10% maiores em corpos de prova tratadas termicamente, quando comparado àqueles não tratados (Figuras 23 e 24). Esperava-se que o efeito do tratamento térmico gerasse valores superiores nos corpos de prova tratados termicamente, tornando-os mais resistentes, uma vez que há um incremento nas propriedades da madeira ao realizar-se este processo. Não há na literatura trabalhos que retratem especificamente sobre o efeito do tratamento térmico na resistência experimental das ligações pregadas em madeiras de *Pinus caribaea* var. *caribaea* e, como este estudo encontrou valores maiores em corpos de prova tratados termicamente, para todas as condições (independente da direção de carregamento e da umidade relativa do ar), apesar dos mesmos não terem sido significativos estatisticamente, considera-se que o tratamento térmico pode ser um procedimento vantajoso, pois o teor de umidade de equilíbrio é reduzido com o incremento da temperatura do tratamento térmico imposto na madeira (Tabela 2) e, inclusive, Bodig e Jayne (1982), Haygreen e Bowyer (1996), Oliveira (1997) dentre outros autores citaram que a diminuição da umidade do material influencia positivamente na suas propriedades mecânicas. Porém, necessita-se de mais estudos e experimentações, talvez variando o programa do tratamento térmico (ao variar a temperatura e o tempo de exposição da madeira no tratamento térmico, por exemplo), até que possam encontrar valores estatisticamente significativos, que comprovem na teoria e na prática a viabilidade e a importância deste procedimento para as ligações pregadas com madeiras de *Pinus caribaea* var. *caribaea*.

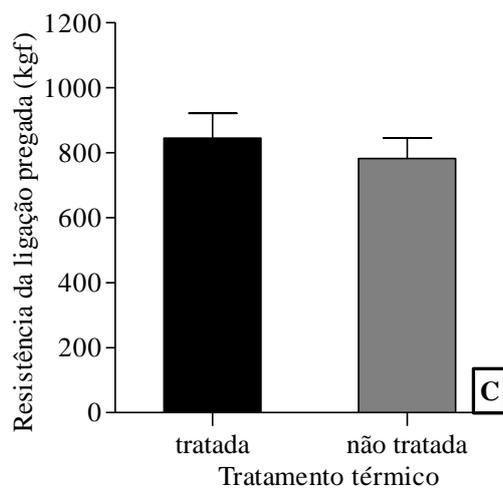
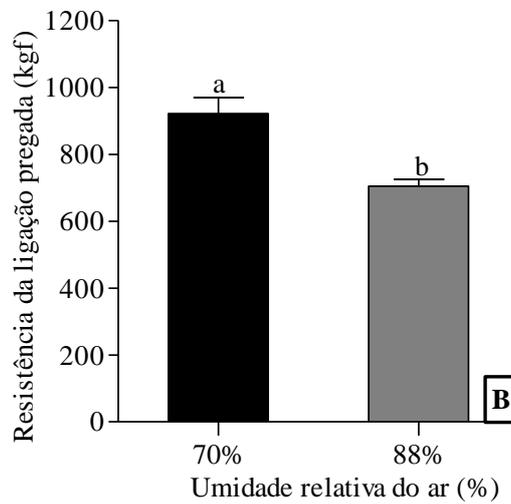
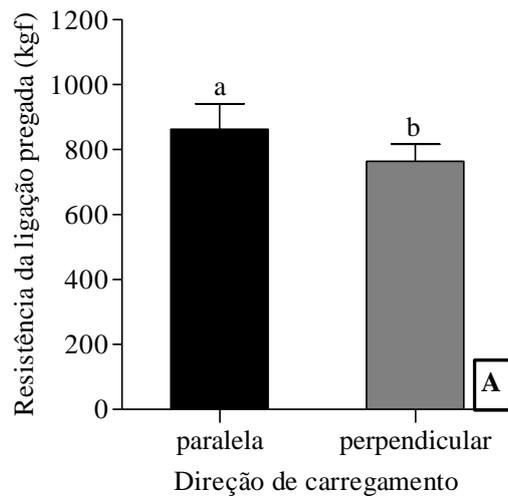


Figura 23. Resistência experimental da ligação pregada **A.** Ao variar a direção de carregamento. **B.** Ao variar a umidade relativa do ar. **C.** Ao variar o tratamento térmico. As letras minúsculas comparam as médias pelo teste Tukey a 5% de significância.

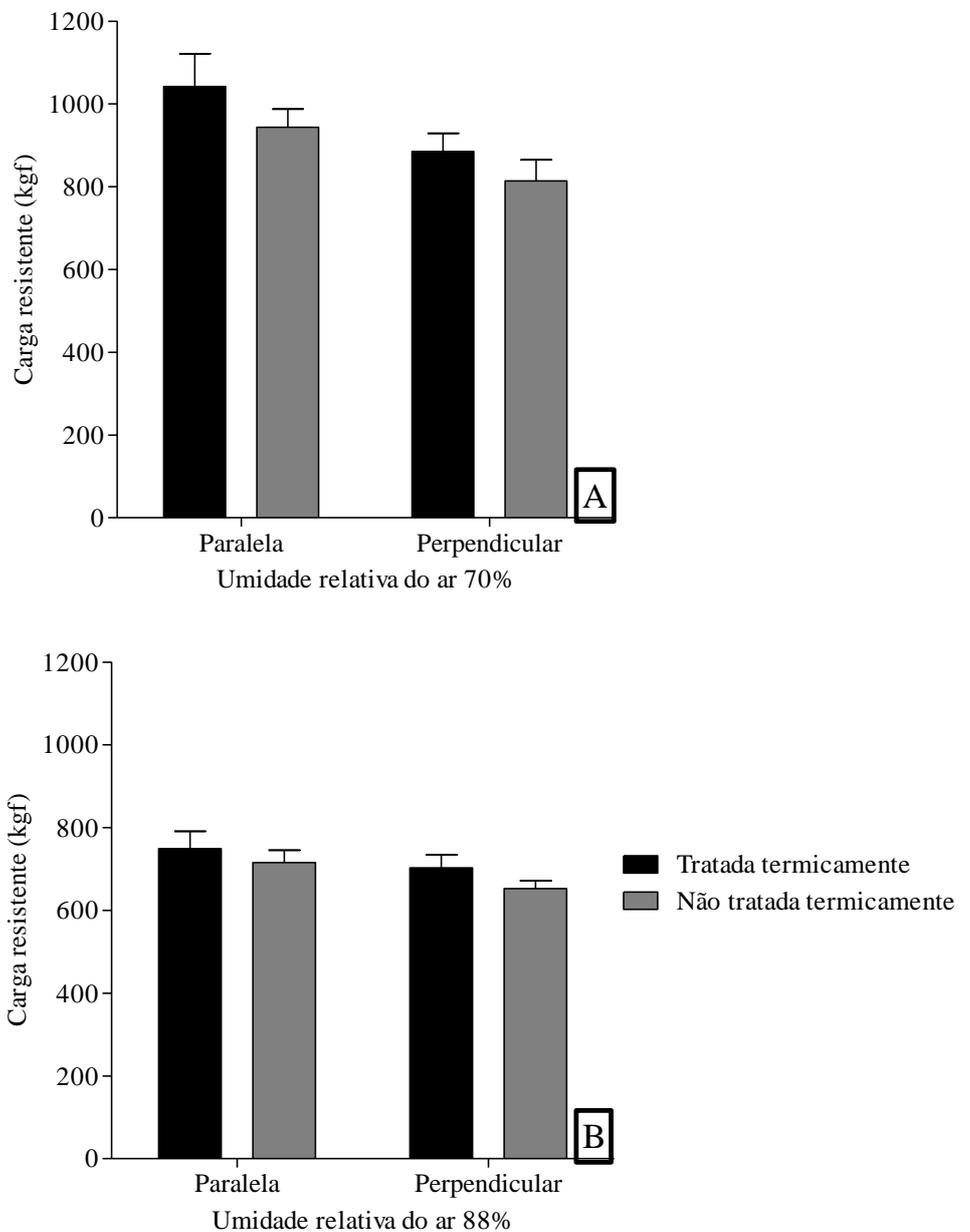


Figura 24. Resistência experimental da ligação pregada para cada condição de direção de carregamento e tratamento térmico. **A.** A 70% de umidade relativa do ar. **B.** A 88% de umidade relativa do ar.

Na Tabela 8, encontram-se as razões entre os valores de resistência experimental e de cálculo das ligações pregadas, também conhecida como fator de segurança, para todas as condições.

Tabela 8. Fator de segurança das ligações pregadas.

Fator de segurança - R_{exp}/R_d							
Direção	Tratamento	Condição do ambiente					
		UR=70%			UR=88%		
		R_{exp}	R_d	R_{exp}/R_d	R_{exp}	R_d	R_{exp}/R_d
Paralela	NT	944	298	3,2	715	208	3,4
	T	1042	378	2,8	749	298	2,5
Média				3,0	3,0		
Perpendicular	NT	814	161	5,1	653	118	5,5
	T	885	207	4,3	703	162	4,3
Média				4,7	4,9		

Em que: NT = Não tratada termicamente; T = Tratada termicamente; UR = Umidade relativa do ar; R_{exp} = Resistência experimental da ligação pregada; R_d = Resistência de cálculo da ligação pregada; R_{exp}/R_d = Razão entre valores experimentais e de cálculo da ligação pregada.

Nota-se, através da Tabela 8, que os valores de resistência experimental para madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea* foram superiores aos valores de resistência calculados através das equações da NBR 7190 (ABNT, 1997). Este resultado é similar ao encontrado por Oliveira e Dias (2005), que, ao estudar ligações pregadas em madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii*, concluiu que espécies de menor densidade, tais como as espécies do gênero *Pinus*, os resultados experimentais tendem a fornecer valores superiores aos obtidos pelo critério teórico da norma.

A razão entre os valores experimentais e de cálculo é o fator de segurança da ligação e, neste estudo, é possível verificar que a carga de projeto prevista pela norma é, em média, 3 e 4,8 vezes menor que a carga experimental resistente para direção de carregamento paralela e perpendicular às fibras, respectivamente.

Além disso, a razão entre os valores de resistência experimentais e estimados pelo cálculo foi superior nos corpos de prova em que a direção da força foi perpendicular às fibras para todos os tratamentos. Oliveira e Dias (2005) encontrou o mesmo comportamento ao comparar a razão entre resistência experimental e de cálculo de *Pinus elliottii* var. *elliottii*, ao verificar que na ligação cuja direção é perpendicular às fibras, a razão é muito mais expressiva do que aquela obtida para a ligação na direção paralela às fibras. Essa relação indica a diferença entre a resistência da ligação obtida experimentalmente e a resistência obtida pelo critério teórico da norma.

Na Figuras 25 e 26, encontram-se imagens de corpos de prova para cada condição após a ruptura, para direção paralela e perpendicular às fibras, respectivamente. É possível notar que em alguns corpos de prova houve até rachaduras. Na direção de carregamento perpendicular às fibras, é possível verificar uma deformação maior nos furos em que os pinos conectores (pregos) estavam inseridos.

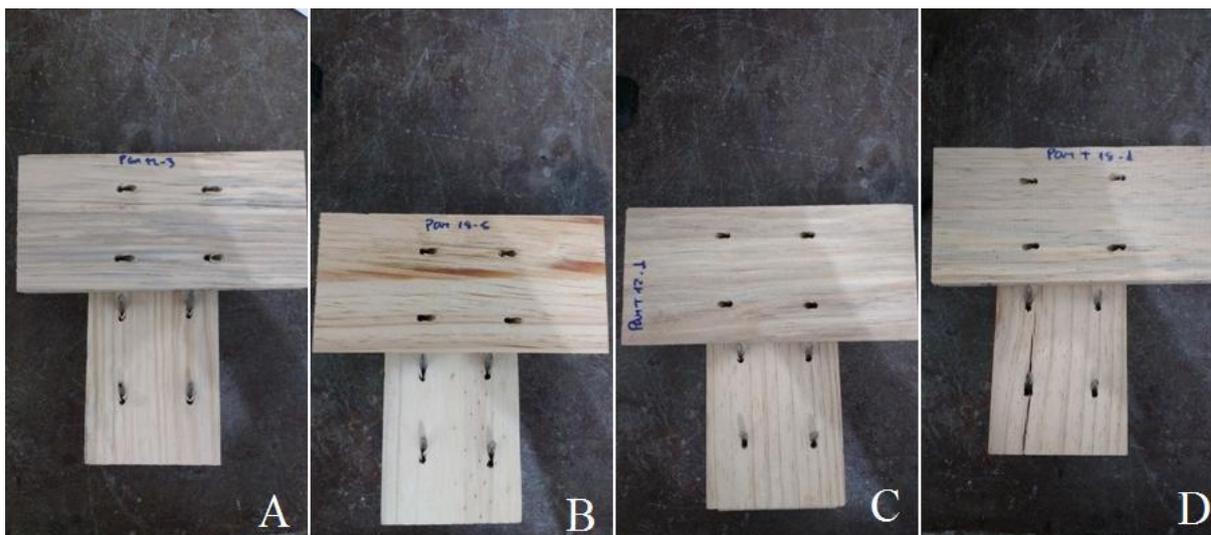


Figura 25. Corpos de prova dos tratamentos com direção de carregamento paralela às fibras da madeira, após a realização dos testes mecânicos. **A.** Sem tratamento térmico a 70% de umidade relativa do ar. **B.** Sem tratamento térmico a 88% de umidade relativa do ar. **C.** Com tratamento térmico a 70% de umidade relativa do ar. **D.** Com tratamento térmico a 88% de umidade relativa do ar.

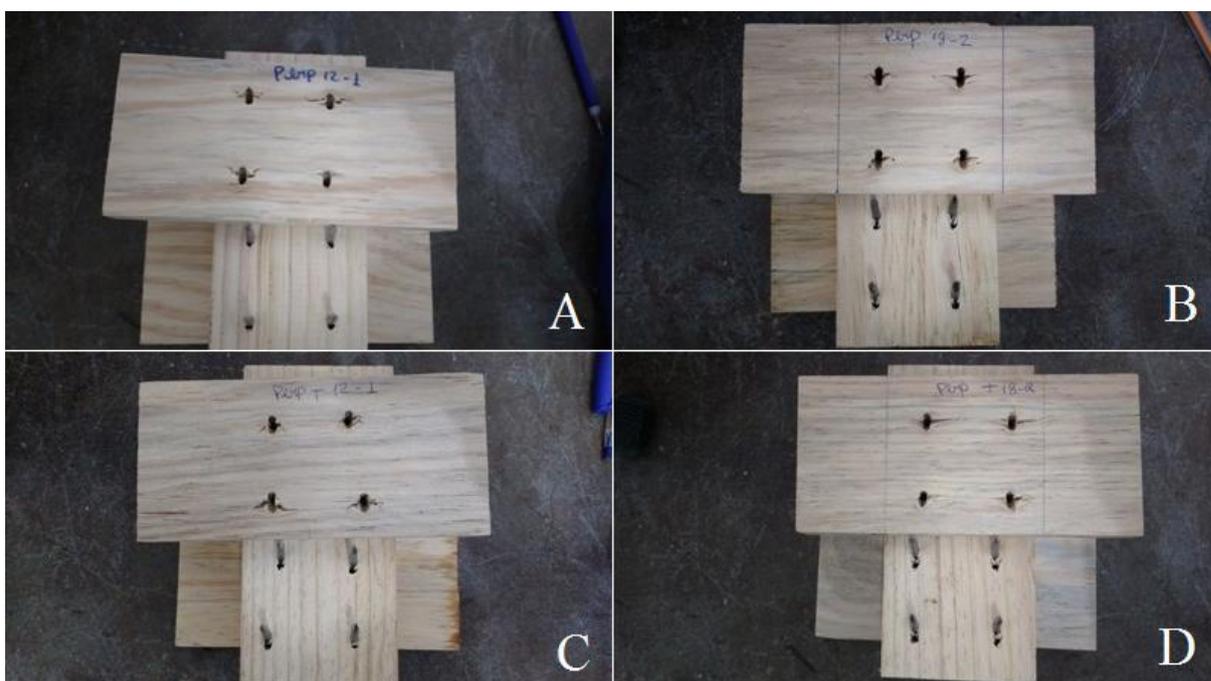


Figura 26. Corpos de prova dos tratamentos com direção de carregamento perpendicular às fibras da madeira, após a realização dos testes mecânicos. **A.** Sem tratamento térmico a 70% de umidade relativa do ar. **B.** Sem tratamento térmico a 88% de umidade relativa do ar. **C.** Com tratamento térmico a 70% de umidade relativa do ar. **D.** Com tratamento térmico a 88% de umidade relativa do ar.

5. CONCLUSÃO

Alguns comentários e conclusões já foram relacionados ao longo do texto deste trabalho. São apresentadas, a seguir, as principais conclusões obtidas no estudo da resistência da ligação pregada em madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea*:

O tratamento térmico reduziu o teor de umidade de equilíbrio da madeira, em 4,7 e 7,4 pontos percentuais, quando exposta à umidade relativa do ar de 70% e 88%, respectivamente.

Quanto à resistência da ligação, a direção de carregamento foi significativa, sendo a direção perpendicular menos resistente que a direção paralela.

O efeito da umidade relativa do ar foi estatisticamente significativo e, conforme o esperado, os corpos de prova climatizados em umidade relativa do ar a 70% obtiveram valores superiores. Além disso, para cada variação percentual da umidade de equilíbrio da madeira, a variação da resistência pregada variou entre 4,2 e 9,8%.

O efeito do tratamento térmico não foi significativo, apesar da tendência de aumento de resistência ao embutimento da madeira tratada termicamente.

Os valores da resistência experimental da ligação pregada foi, em média, 3 e 5 vezes maior que o valor da resistência de cálculo, para as direções de carregamento paralela e perpendicular às fibras, respectivamente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, P. A. O. **Uniões pregadas de madeira**. 174 f. São Paulo, 1987. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.
- ANDRADE, A. A.; CRONEMBERGER, P de T.; LOURDES, M. **Ligações com pinos metálicos em galpões rurais utilizando toras de carnaúba**. In EBRAMEM, n°7, 2000, São Carlos.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190: Projetos de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASTM D198-15, **Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- AWOYEMI, L.; JONES, I. P. Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (*Thuja plicata*) wood during heat. **Wood Science Technology**, n.45, p.261-267, 2011.
- BENDTSEN, B. A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest products journal**, 1978.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982, 712p.
- BORGES, L. M.; QUIRINO, W. F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Revista Biomassa & Energia**, v.1, n.2, p.173-182, 2004.
- RUBIM, I. B. **Avaliações de ligações com cavilhas, parafusos e cavilhas em peças de madeira de *Eucalyptus spp.*** 2006. 54 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003.
- CASTRO, J. A madeira de eucalipto como matéria-prima para a indústria moveleira. In: III Seminário de Produtos Sólidos de Madeira de Eucalipto – SIF Belo Horizonte; **Anais...** Viçosa: SIF/UFV/DEF. 2005, p. 1-25.
- CONCEIÇÃO, F. P.; CAMARGO, I. S.; NASCIMENTO, A.M. Efeito do lenho e umidade na resistência ao embutimento e compressão em madeira de pinus. In: III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 2017. **Anais** do III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 2017. p. 61428.
- DE CASTRO, V. R.; FILHO, M. T.; SURDI P. G. Avaliação do perfil radial do lenho de árvores de *Pinus* (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf.) por densitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p.353-360, 2014.

DEL MENEZZI, C. H. S. **Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partícula orientadas (OSB)**. 2004. 225p. Tese (Doutorado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

CHUDNOFF, M. **Tropical Timbers of the World**, Agriculture Handbook, Washington: USDA Forest Service, n. 607, 1984, 466p.

FACCIO, M. E. R. **Importância do gênero *Pinus* spp. para o setor madeireiro no Brasil**. 2010. 61p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia industrial madeireira) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

FRANCIS, J. K. *Pinus caribaea* Morelet, Caribbean pine. **Forest Service**, New Orleans: Department of Agriculture, Southern Forest Experiment Station, 10p. 1992.

GESUALDO, F. A. R. (2003) **Estrutura de Madeira**: Notas de aula. Universidade Federal de Uberlândia, faculdade de Engenharia Civil. Minas Gerais.

GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S.; LUCIA, R. M. D. SARTORIO, R. C. Estudo de algumas propriedades mecânicas da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 501-509, 2009.

HAKKOU, M., PÉTRISSANS, M., GÉRARDIN, P. Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. **Polymer degradation and stability**, v.91, p.393-397, 2006.

HAYGREEN, J. G.; BOWYER, J. L. **Forest products and wood science: an introduction**. Iowa State University Press/AMES, 1996. 484p.

JANKOWSKY, I. P. Fundamentos de secagem de madeiras. **Documentos Florestais**. Piracicaba, p. 1-13, Junho, 1990.

JANKOWSKY, I. P. Variação Sazonal da umidade de equilíbrio para madeira de *Pinus*. **IPEF**, Piracicaba, n. 31, p. 41-46, dez. 1985.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer, v. 2, 1968. 674 p.

LIMA, A. F.; JARÁ, E. R. P.; ALFONSO, V. A. Madeira como matéria-prima para fabricação de pasta celulósica. In: PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. p.129-167.

LOGSDON, N. B. Sobre os ensaios de retrações e inchamentos. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, ano 1, n.2, p.19-24, 2000.

LOGSDON, N. B. Estabilidade dimensional: Propostas para revisão da NBR 7190/97. In.: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2002. 1 CD-ROM.

MADY, F. T. M. **Conhecendo a madeira**. Não paginado. Disponível em: <<http://www.conhecendoamadeira.com/>> Acesso em: 11 de abril 2018.

MEIRELLES, C. R. M.; DINIS, H.; SEGALL, M. L.; SANT'ANNA, S. S. Considerações sobre o uso da madeira no Brasil em construções habitacionais. **III Fórum de Pesquisa FAU Mackenzie**. São Paulo, 2007.

MODES, K. S. **Efeito da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológica das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis***. 2010. 99p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, 2010.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira**. 4. ed. Curitiba: UFPR, 2012. 194p.

MOUSSOURIS, Y.; REGATO, P. 1999. **Forest Harvest: An Overview of Non Timber Forest Products in the Mediterranean Region**. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x5593e/x5593e03.htm>> Acesso em: 05 de Abri de 2016.

MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Efeito da termoretificação sobre as propriedades colorimétricas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, v.39, n.89, p.069-076, mar. 2011.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. São Paulo, 1997. 429f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica/Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TAMAZELLO FILHO, M. **Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de Eucalipto**. Revista Árvore. Viçosa – MG, v.29, n.1, 2005.

OLIVEIRA, M. A. M. (2001). **Ligações com pinos metálicos em estruturas demadeira**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos -Universidade de São Paulo.

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

PALLAROLAS, E. A. F. F. **Estudo da resistência ao embutimento de pinos de aço em peças estruturais de madeira de reflorestamento**. 2017. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

PONCSÁK, S. et al. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Science Technology**, v.40, p.647-633, 2006.

PORTAL MADEIRA TOTAL. **O Pinus no Brasil: *Pinus caribaea* e suas três variedades – *caribaea*, *bahamensis* e *hondurensis***. 2005. Disponível em: <www.madeiratotal.com.br>. Acesso em: 17 mar. 2018.

REMADE. **Estudo aponta uso sustentável de madeira para casas**. 2007. Disponível em <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1015&subject=Constru%20E7%E3%20Civil&title=Estudo%20aponta%20uso%20sustent%20El%20vel%20da%20madeira%20para%20casas>. Acesso em: 05 de jun. 2018.

STAMATO, G. C.; CALIL JUNIOR, C. **Resistência ao embutimento da madeira compensada**. Caderno de Engenharia de Estruturas, São Carlos, nº18, p.49-76, 2002.

TJEERDSMA, B. F.; MILITZ, H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. **Holzalsroh-und Werkstoff**, v.63, n.2, p.102-111, 2005.

TSOUMIS, G. et al. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

WANG, H.; MALCOLM, D. C.; FLETCHER, A. M. *Pinus caribaea* in China: Introduction. genetic resources and future prospects. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 117, p. 1-15, 1999.

WINDEISEN, E. et al. Chemical changes during the production of thermo-treated *beech* wood. **Wood Science and Technology**, v.41, n.6, p.523-536, 2007.

YILDIZ, S.; GEZER, E. D.; YILDIZ, E. C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. **Building and environment**, v.41, n.12, p.1762-1766, 2006.

7. ANEXO

Parâmetro analisados por testes estatísticos.

DENSIDADE

ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Intercept	1	14261695	14261695	12345,84	0,000000
Tratamento	1	5119	5119	4,43	0,041610
Direção	1	434	434	0,38	0,543154
Condição	1	167	167	0,14	0,705555
Tratamento*Direção	1	3	3	0,00	0,959978
Tratamento*Condição	1	143	143	0,12	0,726391
Direção*Condição	1	34	34	0,03	0,863799
Tratamento*Direção*Condição	1	171	171	0,15	0,702123
Erro	40	46207	1155		

*Valores em vermelho apontam diferença significativa nos efeitos analisados. Em que: Tratamento = Tratado termicamente ou não; Direção = paralela ou perpendicular às fibras; Condição = Umidade relativa do ar a 70% ou 88%.

RESISTÊNCIA EXPERIMENTAL DA LIGAÇÃO PREGADA CORRIGIDA PELA UMIDADE E DENSIDADE

ANOVA					
Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Intercept	1	31739427	31739427	2530,330	0,000000
Tratamento	1	48342	48342	3,854	0,056610
Direção	1	117086	117086	9,334	0,003992
Condição	1	560869	560869	44,714	0,000000
Tratamento*Direção	1	89	89	0,007	0,933273
Tratamento*Condição	1	5596	5596	0,446	0,508020
Direção*Condição	1	23780	23780	1,896	0,176211
Tratamento*Direção*Condição	1	1438	1438	0,115	0,736649
Erro	40	501744	12544		

*Valores em vermelho apontam diferença significativa nos efeitos analisados. Em que: Tratamento = Tratado termicamente ou não; Direção = paralela ou perpendicular às fibras; Condição = Umidade relativa do ar a 70% ou 88%.