

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

ANDREZA GERALDI

**DESEMPENHO DE LIGAÇÕES DUPLAS PARAFUSADAS DE *PINUS*
SP. SUBMETIDAS A EFEITO DE TEMPERATURA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
2017

ANDREZA GERALDI

**DESEMPENHO DE LIGAÇÕES DUPLAS PARAFUSADAS DE *PINUS*
SP. SUBMETIDAS A EFEITO DE TEMPERATURA**

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

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris

TOLEDO

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de N° 082

DESEMPENHO DE LIGAÇÕES DUPLAS PARAFUSADAS DE *PINUS* SP. SUBMETIDAS A EFEITO DE TEMPERATURA

Por

Andreza Geraldi

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10:20h do dia **20 de outubro de 2017** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof^a MSc Patrícia Cristina Steffen
(UTFPR – TD)

Prof Dr. Rafael Admar Bini
(UTFPR – TD)

Prof Dr. Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)
Orientador

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

Dedico esta conquista ao meu querido pai, Leomar Geraldini, pessoa sem a qual nada disso teria sido possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai, Leomar, pelo apoio incondicional durante o curso. Mesmo que tenha sido de maneira sutil e silenciosa, foi o meu maior incentivador nesta caminhada e a pessoa mais importante da minha vida. Ações são mais significativas do que palavras.

Ao Prof. Gustavo Savaris, pela paciência, disponibilidade, empenho e grande ajuda desde o desenvolvimento da ideia do trabalho, há mais de um ano, até a sua finalização. Não poderia ter tido melhor orientação do que essa.

À minha grande amiga Julia pela valiosa amizade e pelo incentivo nos vários momentos de cansaço e frustração. Obrigada por ser um exemplo de resiliência e não me deixar desistir de nada, nem mesmo quando grandes imprevistos apareceram.

Ao meu namorado e melhor amigo, Gabriel, pelo carinho, paciência e compreensão nas minhas ausências e nos meus desesperos. Agradeço por receber minhas queixas e compartilhar as alegrias.

À minha irmã, Bruna, por ser a impassível ouvinte das minhas reclamações e conquistas. Também por ser minha eterna companheira, a constante da minha vida. Obrigada pelas risadas proporcionadas e pelos momentos de descontração.

À minha mãe, Dirlei, e aos meus avós, Maria e Ildolino (*in memoriam*), pela ajuda e preocupação.

E a todos os outros que fizeram parte da minha formação direta ou indiretamente, o meu muito obrigada.

RESUMO

GERALDI, Andreza. Desempenho de ligações duplas parafusadas de *Pinus* sp. submetidas a efeito de temperatura. 2017. 63 f. Monografia (Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2017.

Este trabalho avalia, experimentalmente, o desempenho residual de ligações duplas de *Pinus* sp. após submetidas a temperaturas entre 200 °C e 300 °C com posterior resfriamento. A caracterização do material foi realizada com ensaios de teor de umidade e de resistência à compressão paralela às fibras, seguindo as condições da NBR 7190:1997. Para determinação da resistência de ligações, foram montados corpos-de-prova com dois parafusos e ligação em cisalhamento duplo. Foram definidos seis tratamentos para as ligações: madeira natural, madeira seca em estufa, e madeira exposta à alta temperatura durante quatro tempos de exposição: meia hora, uma hora, uma hora e meia ou três horas. As ligações foram submetidas à ensaio de compressão, sendo avaliada a carga para um deslocamento de 10 mm e para ruptura. A madeira de *Pinus* sp. apresentou resistência à compressão paralela às fibras no estado natural igual a 79,03 kN e no estado seco igual a 131,14 kN. A resistência média das ligações em estado natural foi de 37,84 kN e em estado seco igual a 47,05 kN. Quando submetidas a alta temperatura, as ligações apresentaram resistência média igual a 48,95 kN, 49,26 kN, 33,93 kN e 26,34 kN, para tempo de exposição de meia hora, uma hora, uma hora e meia e três horas, respectivamente. O pico de resistência foi obtido após uma hora de aquecimento, quando a resistência residual superou a resistência em umidade de compra em 30,18%. As resistências obtidas experimentalmente foram comparadas com as estimativas das normas de dimensionamento de estruturas de madeira brasileira (NBR 7190:1997) e europeia (Eurocode 5:2004, parte 1-1), que apresentaram valores conservadores, sendo suas estimativas inferiores a até mesmo a menor resistência obtida experimentalmente, para aquecimento de três horas. Os resultados demonstraram que, apesar da exposição à altas temperaturas exercerem influência no desempenho das ligações, as normas apresentam grande margem de segurança, mesmo em situações de incêndio.

Palavras-chave: *Pinus* sp. Ligações duplas parafusadas. Temperaturas altas. Tempo de exposição. Resistência.

ABSTRACT

GERALDI, Andreza. Performance of bolted double joints of *Pinus* sp. subjected to temperature. 2017. 63 f. Monografia (Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2017.

This work evaluates, experimentally, the residual performance of double joints of *Pinus* sp. after being submitted to temperatures between 200°C and 300°C with subsequent cooling. The material description was carried out with tests of moisture content and strength parallel to the grain, following the NBR 7190:1997 conditions. To determine the joints' strength, specimens with two bolts and double shear were made. Six connections' treatments were defined: natural wood, oven dried wood, and wood exposed to high temperature during four exposure times: half hour, one hour, one hour and a half, and three hours. The connections were subjected to the compression test, with the load being evaluated for a 10 mm displacement and for rupture. The *Pinus* sp. wood showed strength parallel to the grain in natural state of 79.03 kN and in the dried state of 131.14 kN. The mean connections resistance in natural state was 37.84 kN and in the dried state it was 47.05 kN. When subjected to high temperature, the connections showed mean resistance of 48.95 kN, 49.26 kN, 33.93 kN and 26,34 kN, for exposure times of half hour, one hour, one hour and a half, and three hours, respectively. The strength peak was obtained after one hour of heating, when the residual resistance overcame the resistance in natural state in 30.18%. The strengths obtained experimentally were compared to the estimates of the Brazilian (NBR 7190:1997) and the European (Eurocode 5:2004, part 1-1) wood structures scaling standards, which presented conservative values, its estimates were even inferior to the lowest strength obtained experimentally, of the three hours heating. The results presented that, despite the exposure to the high temperatures influence on the connections performance, the standards have big safety margin, even in fire situations.

Keywords: *Pinus* sp. Bolted double joints. High temperatures. Exposure time. Strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de ligações duplas de madeira.	16
Figura 2 – Espaçamentos mínimos da norma brasileira (em mm).	18
Figura 3 – Espaçamentos mínimos e máximos da norma europeia (em mm).....	18
Figura 4 – Modos de ruptura pela norma europeia.	20
Figura 5 – Seção carbonizada de madeira.....	25
Figura 6 – Parafuso, arruelas e porca.	34
Figura 7 – Ensaio do teor de umidade.	35
Figura 8 – Dois grupos de ensaio de compressão.	36
Figura 9 – Compressão paralela às fibras.....	37
Figura 10 – Dimensões das talas de madeira utilizadas (em mm).	38
Figura 11 – Furação das peças para encaixe dos parafusos.....	39
Figura 12 – Configuração das ligações (em mm).....	39
Figura 13 – Secagem das talas de madeira.	41
Figura 14 – Ligações em processo de aquecimento.	41
Figura 15 – Termômetro por infravermelho.....	42
Figura 16 – Ensaio das ligações de madeira.....	43
Figura 17– Corpo-de-prova recém saído da estufa.....	45
Figura 18 – Corpos-de-prova após ruptura na prensa.	46
Figura 19 – Ligações do Grupo 1 antes do ensaio.....	47
Figura 20 - Ligações do Grupo 1 após o ensaio de ruptura.	47
Figura 21 – Ligações do Grupo 3 após aquecimento.....	48
Figura 22 – Ligações do Grupo 3 após ensaio de ruptura.	49
Figura 23 – Ligações do Grupo 4 após aquecimento.....	50
Figura 24 – Ligações do Grupo 4 após ensaio de ruptura.	51
Figura 25 – Ligações do Grupo 5 após aquecimento.....	51
Figura 26 – Ligações do Grupo 6 após aquecimento.....	52
Figura 27 – Ligações do Grupo 6 após ensaio de ruptura.	53
Figura 28 – Resumo dos resultados do ensaio de ruptura.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efeitos causados pela temperatura na madeira.	26
Tabela 2 - Tratamentos das ligações de madeira.	40
Tabela 3 – Resultados do ensaio do teor de umidade.	44
Tabela 4 – Compressão paralela às fibras.	45
Tabela 5 - Resumo dos resultados dos ensaios de ruptura.	53
Tabela 6 – Resumo dos dados.....	55
Tabela 7 – Análise de variância.	55
Tabela 8 – Resultado do teste de Tukey.	56
Tabela 9 – Resistência experimental e resistências teóricas.	57
Tabela 10 – Resultado do Grupo 1.	64
Tabela 11 – Resultado do Grupo 2.	64
Tabela 12 – Resultado do Grupo 3.	64
Tabela 13 – Resultado do Grupo 4.	65
Tabela 14 – Resultado do Grupo 5.	65
Tabela 15 – Resultado do Grupo 6.	65

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Parâmetro de cálculo, adimensional
t	Menor espessura da ligação, em mm
d	Diâmetro do parafuso, em mm
β_{lim}	Parâmetro de cálculo, adimensional
$f_{y,k}$	Tensão de escoamento característica do parafuso, em MPa
f_{ed}	Equivalente a resistência à compressão paralela às fibras com teor de umidade de 12%, em MPa
$R_{vd, 1}$	Resistência de um parafuso em um plano de corte, em N
$f_{e,c}$	Resistência ao embutimento paralelo às fibras na peça central, em MPa
$f_{e,l}$	Resistência ao embutimento paralelo às fibras na peça lateral, em MPa
ρ_k	Massa específica da madeira, em kg/m ³
$R_{vd, 2}$	Resistência de um parafuso em corte duplo, em N
t_l	Espessura da peça lateral, em mm
t_c	Espessura da peça central, em mm
M_p	Momento resistente de dimensionamento de plastificação característico do parafuso, em Nmm
F_{ax}	Resistência característica axial de afastamento (<i>rope effect</i>), pode ser considerada zero quando desconhecida, como no caso deste trabalho
U_i	Teor de umidade da peça, em %
m_i	Massa inicial, em g
m_s	Massa seca, em g
$f_{c0,i}$	Resistência à compressão paralela às fibras da peça, em MPa
$F_{c0,máx.}$	Força máxima aplicada ao corpo-de-prova, em N
A	Área da seção transversal da peça, em mm ²
$f_{c0,12}$	Resistência característica à compressão paralela às fibras em 12% de umidade, em MPa
$f_{c0,k}$	Resistência característica à compressão paralela às fibras, em MPa
U_m	Teor de umidade médio do lote, em %

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVO GERAL	14
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 UTILIZAÇÃO DA MADEIRA EM ESTRUTURAS	15
2.2 LIGAÇÕES POR PARAFUSOS DE PORCA E ARRUELA	17
2.3 RESISTÊNCIA TEÓRICA DAS LIGAÇÕES	19
2.4 EFEITO DA TEMPERATURA NAS ESTRUTURAS DE MADEIRA.....	22
2.5 TRABALHOS RECENTES	27
2.5.1 Moraes, Rodrigues e Correia (2011)	27
2.5.2 Manríquez (2012)	28
2.5.3 Audebert <i>et al.</i> (2012).....	29
2.5.4 Schneid <i>et al.</i> (2014)	31
2.5.5 Lopes <i>et al.</i> (2014)	31
2.5.6 Barreiros e Belezia (2016).....	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 MATERIAIS	34
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	34
3.2.1 Ensaio do teor de umidade conforme NBR 7190:1997	35
3.2.2 Ensaio resistência à compressão paralela às fibras conforme NBR 7190:1997	36
3.3 EXPERIMENTAÇÃO DAS LIGAÇÕES	38
3.4 TRATAMENTOS DAS LIGAÇÕES.....	40
3.5 INSTRUMENTAÇÃO E EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE LIGAÇÕES	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 TEOR DE UMIDADE	44
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS	44
4.3 RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES	46
4.3.1 Valores das resistências.....	46
4.3.2 Comparação entre as resistências	53

4.3.3 Análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey	55
4.4 RESISTÊNCIA DAS NORMAS	57
5 CONCLUSÕES	59
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
APÊNDICE A	64

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, edificações feitas com madeira são vistas como sinônimos de obras de qualidade inferior, isso porque ao longo da história foram empregadas constantemente técnicas construtivas inadequadas nesse tipo de construção. Além disso, o Brasil possui uma forte influência da cultura portuguesa de construções em alvenaria (MEIRELLES *et al.*, 2007).

Mas residências de madeira já foram bastante utilizadas no sul e sudeste do país, onde o Pinho do Paraná era abundante. Isso até 1905, quando edificações desse material foram proibidas no centro de Curitiba, contribuindo para sua rejeição pela sociedade (MEIRELLES *et al.*, 2007).

Hoje, no Brasil, instituições financeiras resistem em financiar e fornecer seguros para edificações em madeira. Acredita-se que essas obras são mais vulneráveis a incêndios do que as outras. No entanto, em países da América do Norte e da Europa, edificações em madeira são muito comuns. Lá, inclusive, o processo é altamente industrializado e até mesmo a estrutura das obras é feita com madeira (MANRÍQUEZ; MORAES, 2009).

No ano de 2016, apesar da relutância em se trabalhar com madeira, Curitiba recebeu o primeiro prédio do país feito com este material. O edifício de três pavimentos foi construído em *wood frame*, tendo fundação de concreto e paredes com isolamento acústico e placas de gesso resistentes ao fogo. Segundo a empresa responsável, é possível que uma equipe de cinco pessoas finalize uma construção de 45 m² em duas horas (MARTINS, 2016).

Vale acrescentar que a redução de resíduos, com a utilização da madeira, é da ordem de 85% e a redução do consumo de água é de 90%. A obra, inclusive, faz parte do programa do governo federal “Minha Casa, Minha Vida”, o que mostra uma tendência positiva em relação a financiamentos de residências de madeira, o que é bastante novo e incomum.

Para um projeto com estrutura de madeira ser elaborado e executado adequadamente, o material e as técnicas construtivas adotadas devem ser bem conhecidas e acessíveis. Todos os esforços devem ser levados em consideração, dentre eles o de altas temperaturas, sejam elas alcançadas por incêndios ou fatores climáticos.

Mesmo que os materiais presentes no interior da edificação sejam mais combustíveis do que a própria obra, não se pode deixar de dizer que a madeira é sim influenciada negativamente, devido à redução das propriedades mecânicas do material, quando exposto à temperaturas altas (AUDEBERT *et al.*, 2013).

No entanto, existem tratamentos que podem ser aplicados na madeira para melhorar as características do material em altas temperaturas, sendo este processo chamado de termorreificação.

Neste sentido, este trabalho avalia experimentalmente o desempenho residual de ligações de *Pinus* sp. após submetidas à temperaturas altas, visto que as ligações são os pontos estratégicos do esquema estrutural.

1.1 JUSTIFICATIVA

As estruturas são projetadas para suportar variados tipos de esforços, entretanto, o conhecimento sobre o desempenho de estruturas de madeira submetidas à altas temperaturas ainda é vago, principalmente no Brasil, onde o material é alvo de grande preconceito.

Para que um projeto de engenharia seja o mais eficiente e durável possível, deve haver o conhecimento mais completo sobre os materiais e técnicas a serem utilizados. Para estruturas de madeira faltam informações acerca do desempenho em situações de temperaturas maiores que a média.

A norma brasileira, NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira (ABNT, 1997), não provê informações e nem disponibiliza dimensionamentos específicos para essa situação. Já a norma europeia, Eurocode 5: Design of timber structures (CEN, 2004), apresenta dimensionamento baseado na curva padrão ISO 834, não havendo critérios para temperaturas entre 20 e 300 °C.

Audebert *et al.* (2012) ressaltam que a falta de material sobre estruturas de madeira submetidas à altas temperaturas se deve ao alto custo e complexidade da realização dos ensaios de laboratório em larga escala. A complexidade se encontra nos diferentes componentes estruturais, seus tamanhos e geometrias, além da anisotropia da madeira.

Abordar o assunto também desmistifica alguns pensamentos errados e traz a ideia de obras em madeira para atualidade, estimulando que engenheiros venham a considerar o material em seus projetos. Esse tipo de construção é uma eficiente alternativa às obras de alvenaria e concreto, pois é altamente sustentável, como salientado nos trabalhos de Meirelles *et al.* (2007) e Martins (2016), e de ótima isolamento térmica, assim como visto em Manríquez e Moraes (2009).

É ainda válido lembrar que, dentro da estrutura as ligações representam os pontos mais delicados. Por esse motivo, o foco do trabalho foi estudar o seu desempenho em específico.

1.2 OBJETIVO GERAL

Estudar o desempenho residual de ligações duplas parafusadas de *Pinus* sp. após submetidas as temperaturas de 200°C a 300°C com posterior resfriamento.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Determinar, experimentalmente, a resistência de ligações feitas com peças de madeira de *Pinus* sp. em estado naturalmente seco e após submissão à altas temperaturas;
- b) Avaliar o comportamento de ligações de madeira de *Pinus* sp. ensaiadas após exposição à altas temperaturas;
- c) Comparar os resultados obtidos experimentalmente com estimativas de resistências calculadas utilizando as equações das normas NBR 7190:1997 e Eurocode 5:2004, parte 1-1.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 UTILIZAÇÃO DA MADEIRA EM ESTRUTURAS

A madeira é um dos materiais mais antigos de construção e cada civilização a utilizou de maneira que atendia suas necessidades (MEIRELLES *et al.*, 2007). Sendo assim, existe uma grande variedade de sistemas estruturais que vêm evoluindo em função de vários produtos industrializados (PFEIL; PFEIL, 2003).

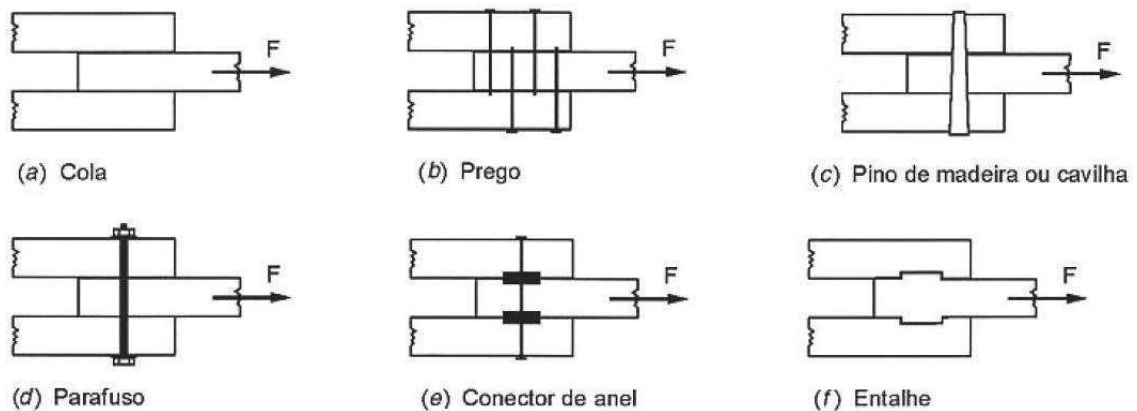
O sistema estrutural mais tradicional é o treliçado, utilizado em coberturas e pontes. Outros exemplos são pórticos de um andar para galpões e pórticos de vários andares para prédios maiores, além de arcos e abóbadas (PFEIL; PFEIL, 2003).

Em comum, todos estes sistemas necessitam de ligações entre os elementos estruturais, elas são extremamente importantes, pois são responsáveis pelas transferências de carga e pela continuidade da edificação (SCHNEID *et al.*, 2014), além de serem determinantes para a duração e resistência da estrutura (AUDEBERT *et al.*, 2013). As ligações também são necessárias, pois os elementos estruturais têm seus comprimentos limitados, de acordo com os troncos das árvores (SZÜCS *et al.*, 2015).

Os principais tipos de ligação são: colagem, pregos, grampos, braçadeiras, pinos, parafusos, conectores metálicos, tarugos e entalhes. Dentre estes as braçadeiras e grampos não são de fato elementos de ligação, apenas auxiliares na montagem (PFEIL; PFEIL, 2003).

Na Figura 1 são mostradas esquematicamente alguns tipos de ligações. Os pinos de madeira ou cavilhas (Figura 1.c) são desconsiderados porque não são utilizados na construção civil, sendo bastante adotados pela indústria moveleira apenas.

Figura 1 – Tipos de ligações duplas de madeira.



Fonte: Pfeil; Pfeil (2003).

Ligação por colagem (Figura 1.a) é um tipo de ligação mais rígido do que os outros (SZÜCS *et al.*, 2015). Dificilmente é utilizada em campo, porque necessita de um programa formal de garantia de qualidade. Costuma ser aplicada em madeira laminada colada e madeira compensada. Nos poucos casos em que esse método é utilizado em obra, o adesivo é associado a pregos (BREYER *et al.*, 2007).

Os pregos (Figura 1.b) e os parafusos (Figura 1.d) são elementos metálicos de eixos cilíndricos, de aço, inseridos em furos feitos à máquina. Os pregos tem seu uso nos Estados Unidos limitado a estruturas de cargas pequenas (BREYER *et al.*, 2007). Sua rigidez varia conforme concentração de conectores: quanto mais concentrados os pregos, mais frágil a ligação (SZÜCS *et al.*, 2015).

Os parafusos podem ser de dois tipos: auto-atarraxantes ou com porca e arruela. Os primeiros são mais utilizados em marcenaria, não sendo escolhidos para ligações estruturais. O segundo tipo é instalado sempre com uma folga, de no máximo 1 milímetro (PFEIL; PFEIL, 2003).

Os conectores metálicos (Figura 1.e) são peças especiais em formato de anel colocadas em sulcos na superfície das peças e que são eficientes transmissores de esforços. Para garantir que as peças não se separem são utilizados parafusos ou grampos também (PFEIL; PFEIL, 2003).

Os entalhes (Figura 1.f) transmitem esforços por contato e, por isso, a ligação trabalha apenas comprimida. Normalmente são utilizadas em estruturas simples. Para evitar separação das peças devem ser utilizados pinos, estribos ou talas pregadas, que são deconsiderados no dimensionamento da ligação (SZÜCS *et al.*, 2015).

2.2 LIGAÇÕES POR PARAFUSOS DE PORCA E ARRUELA

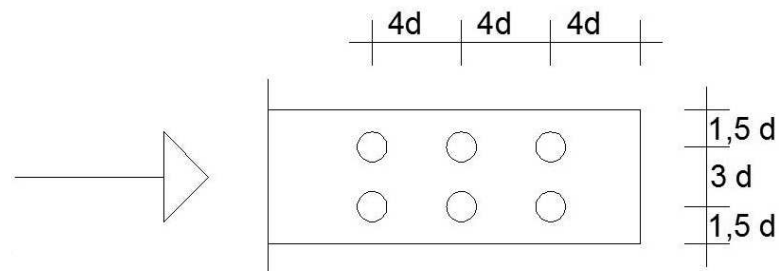
Os parafusos de porca e arruela devem ser instalados em furos previamente realizados, com diâmetro 0,5 mm superior ao diâmetro do fuste do parafuso, segundo a norma NBR 7190:1997, ou até 1 mm, segundo o Eurocode 5:2004 parte 1-1.

Após a inserção do parafuso, as porcas são apertadas comprimindo a madeira transversalmente, favorecendo a ligação por meio do atrito nas interfaces. No entanto, isso não deve ser considerado em projeto porque, devido à deformação da madeira, o esforço permanente desencadeado é aleatório. As arruelas, entre a madeira e a porca, servem para transmissão de cargas e devem estar em total contato com as peças (PFEIL; PFEIL, 2003).

Segundo a NBR 7190:1997 as arruelas devem ter espessura mínima de 9 mm para estruturas de pontes e de 6 mm para construções em geral. Podem ser quadradas ou circulares e seu lado ou diâmetro deve ser de, no mínimo, três vezes o diâmetro do parafuso. De acordo com a mesma norma, o diâmetro do parafuso não pode ser inferior a 10 mm e superior a menor espessura da peça mais delgada da ligação.

Na Figura 2, são apresentados os espaçamentos mínimos, conforme NBR 7190:1997, entre parafusos e entre parafusos e a extremidade da peça na direção de aplicação de carga. Em ambas as situações a distância deve ser de, pelo menos, quatro vezes o diâmetro do parafuso. Já na direção perpendicular, a distância mínima entre parafusos deve ser de três vezes o diâmetro, e entre parafusos e a extremidade, de uma vez e o meia diâmetro.

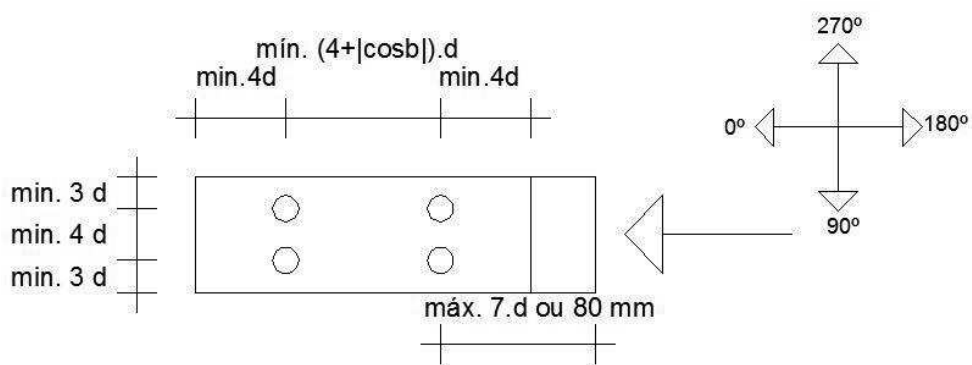
Figura 2 – Espaçamentos mínimos da norma brasileira (em mm).



Fonte: NBR 7190:1997.

A norma europeia, Eurocode 5:2004, parte 1-1, é mais conservadora e também leva em consideração mais variações da angulação da força, conforme Figura 3. No sentido paralelo às fibras, os parafusos devem distar entre si, pelo menos, o número quatro mais o módulo do cosseno do ângulo da força vezes diâmetro do parafuso. Entre parafusos e extremidades a distância mínima é de quatro vezes o diâmetro. Entre os parafusos mais próximos da aplicação de força e a aplicação de força deve haver distância máxima de sete vezes o diâmetro do parafuso ou 80 mm, escolhendo-se o menor valor. No sentido perpendicular às fibras, a distância entre parafusos deve ser, no mínimo, quatro vezes seu diâmetro. Entre os parafusos e as extremidades a distância é de três vezes o diâmetro.

Figura 3 – Espaçamentos mínimos e máximos da norma europeia (em mm).



Fonte: Eurocode 5:2004, parte 1-1.

2.3 RESISTÊNCIA TEÓRICA DAS LIGAÇÕES

A norma NBR 7190:1997 considera dois critérios de ruptura para ligações: pelo embutimento da madeira e pela flexão dos pinos. A primeira situação se refere ao esmagamento da área de contato entre o pino e as peças de madeira. A segunda diz respeito ao escoamento dos conectores.

Essa norma possui um equacionamento para a resistência teórica de ligações por pinos em geral. As Equações (1) e (2) dão os valores dos parâmetros β e β_{lim} , necessários para a determinação do tipo de ruptura.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (1)$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{y,k}/1,1}{fed}} \quad (2)$$

Onde:

t: menor espessura da ligação, em mm;

d: diâmetro do parafuso, em mm;

$f_{y,k}$: tensão de escoamento característica do parafuso, em MPa;

fed: equivalente a resistência à compressão paralela às fibras com teor de umidade de 12%, em MPa.

Se $\beta \leq \beta_{lim}$, então a ruptura ocorrerá pelo esmagamento da madeira. Assim sendo, a Equação (3) dá o valor de resistência de um pino correspondente a uma única seção de corte.

$$R_{vd,1} = 0,4 \frac{t^2}{\beta} fed \quad (3)$$

Onde:

$R_{vd,1}$: resistência de um parafuso em um plano de corte, em N.

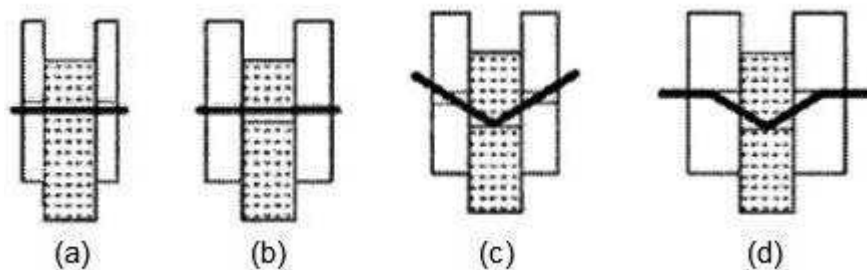
Se $\beta > \beta_{lim}$, então a ruptura acontecerá pela flexão do pino. Nesse caso a resistência será dada pela Equação (4).

$$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} \frac{f_{y,k}}{1,1} \quad (4)$$

O valor de $R_{vd,1}$ deverá ser multiplicado pela quantidade de planos e pela quantidade de parafusos.

Já segundo o Eurocode 5:2004 parte 1-1, existem quatro maneiras de ruptura para ligações duplas. O primeiro modo, em Figura 4.a, é a ruptura por embutimento nas talas laterais. O segundo, em Figura 4.b, é o embutimento na tala central. O terceiro, em Figura 4.c, é a flexão do pino apenas na tala central. O quarto, em Figura 4.d, é a ruptura por flexão dos pinos nas três talas.

Figura 4 – Modos de ruptura pela norma europeia.



Fonte: Eurocode 5:2004, parte 1-1.

O cálculo da resistência teórica por essa norma se inicia pela Equação (5), que dá um novo parâmetro β .

$$\beta = \frac{f_{e,c}}{f_{e,l}} \quad (5)$$

Onde:

$f_{e,c}$: resistência ao embutimento paralelo às fibras na peça central, em MPa;

$f_{e,l}$: resistência ao embutimento paralelo às fibras na peça lateral, em MPa.

A resistência ao embutimento paralelo às fibras, para ambas as peças, é dada pela Equação (6).

$$f_e = 0,0082 (1 - 0,01d)\rho_k \quad (6)$$

Onde:

d: diâmetro do parafuso, em mm;

ρ_k : massa específica da madeira, em kg/m³.

A partir de β o valor de resistência de um pino em ligação de corte duplo será o menor dentre as Equações (7) a (10).

$$R_{vd,2} = f_{e,l} \cdot t_l \cdot d \quad (7)$$

$$R_{vd,2} = 0,5 \cdot f_{e,c} \cdot t_c \cdot d \quad (8)$$

$$R_{vd,2} = 1,05 \frac{f_{e,l} \times t_l \times d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta \cdot (2+\beta) \cdot M_p}{f_{e,l} \cdot t_l^2 \cdot d}} \right] + \frac{F_{ax}}{4} \quad (9)$$

$$R_{vd,2} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2 \cdot M_p \cdot f_{e,l} \cdot d} \quad (10)$$

Onde:

$R_{vd,2}$: resistência para um parafuso em corte duplo, em N;

t_l : espessura da peça lateral, em mm;

d: diâmetro do parafuso, em mm;

t_c : espessura da peça central, em mm;

M_p : momento resistente de dimensionamento de plastificação característico do parafuso, em Nmm;

F_{ax} : resistência característica axial de afastamento (*rope effect*), pode ser considerada zero quando desconhecida, como no caso deste trabalho.

O momento resistente de dimensionamento de plastificação característico do parafuso é obtido pela Equação (11).

$$M_p = 0,3 \cdot f_{y,k} \cdot d^{2,6} \quad (11)$$

Onde:

d: diâmetro do parafuso, em mm;

$f_{y,k}$: tensão de escoamento característica do parafuso, em MPa.

O valor de resistência adotado, $R_{vd,2}$, então deverá ser multiplicado pelo número de pinos.

2.4 EFEITO DA TEMPERATURA NAS ESTRUTURAS DE MADEIRA

As propriedades mecânicas da madeira em condições normais estão relacionadas, principalmente, com a densidade, a anatomia e o teor de umidade desse material. Mas quando ela é exposta a temperaturas elevadas, essas propriedades são modificadas, podendo ocorrer efeitos positivos ou negativos (MANRÍQUEZ, 2012).

Assim sendo, é válido dizer que, em regiões onde a temperatura ultrapassa 35 °C, telhados podem chegar a até 65 °C (MORAES; RODRIGUES; CORREIA, 2011), quando alguns efeitos permanentes começam a aparecer na madeira (ATREYA, 1983; BRYDEN, 1998, BROWNE, 1958, MILLER e BELLAN, 1996, e SHAFIZADEH, 1985 *apud* MANRÍQUEZ; MORAES, 2009). Entre 70 °C e 230 °C já pode ser considerada uma situação de incêndio ou, pelo menos, pré-incêndio.

De um modo geral, entre os efeitos estão a perda de água, liberação de gases e combustão do material lenhoso, fenômenos que modificam diretamente as propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira (MANRÍQUEZ, 2012).

As propriedades mecânicas, especificamente, são alteradas por três razões principais: redução do teor de umidade, surgimento de tensões internas nas fibras e formação de fendas na parede celular (THIAM *et al.*, 2002 *apud* MANRÍQUEZ, 2012).

Os efeitos permanentes se manifestam pela perda de peso de carboidratos, perda de água de adesão e amolecimento da lignina (ATREYA, 1983; BRYDEN, 1998; BROWNE, 1958; MILLER; BELLAN, 1996; SHAFIZADEH, 1985 *apud* MANRÍQUEZ; MORAES, 2009), refletindo diretamente nas propriedades mecânicas da madeira.

A lignina é um dos três polímeros naturais da madeira; sua quantidade varia entre 15 e 30% do material, sendo a sua substância mais abundante. Ela exerce a função adesiva entre os diversos tecidos da árvore, dando-lhes rigidez e resistência. Os outros dois polímeros são celulose e hemicelulose, juntos são chamados de holocelulose. (SANTOS, 2008).

A composição química da lignina é bem diferente da composição da holocelulose. Isto é provado no trabalho de Brito e Barrichelo (2001), os autores aqueceram corpos-de-prova de madeira em temperatura ambiente até 300 °C em 90 minutos. A lignina demorou 65 minutos para ter seu peso reduzido a metade, enquanto a celulose necessitou de apenas cinco minutos. No final do ensaio ainda restaram 47% de lignina enquanto não havia mais nenhum resquício de celulose.

Até os 100 °C ocorrem mudanças na estrutura da lignina devido a saída de umidade (WESTERMARK *et al.*, 1995; KACÍK *et al.*, 1999 *apud* MANRÍQUEZ, 2012). Entre 100 °C e 150 °C ocorre a transição vítrea da lignina, sendo esta a alteração do estado ordenado rígido para um estado desordenado que origina o comportamento plástico (SALMEN, 1982 *apud* MANRÍQUEZ, 2012). Entre 150 °C e 200 °C ocorre o seu reendurecimento (SCHAFFER, 1973 *apud* MANRÍQUEZ, 2012), o que pode ocasionar aumento de resistência. A partir dos 200 °C ocorre aumento forte da taxa de degradação da lignina (SIVONEN *et al.*, 2002; MANGALAM, 2005 *apud* MANRÍQUEZ, 2012).

Algumas modificações provenientes do calor podem ser vantajosas, inclusive existe um processo chamado termorretificação, que usa de exposição ao calor para melhorar o desempenho do material.

A termorretificação deve ocorrer em faixas de temperatura entre 120 °C e 280 °C, pois abaixo de 120 °C se considera apenas uma secagem de alta temperatura e acima de 280 °C ocorre torrefação, quando as características estruturais não são mais garantidas (SILVA, 2011).

O processo não deve provocar a degradação completa dos componentes químicos fundamentais, apenas alterações parciais devem ocorrer (SILVA, 2011), resultando em um produto diferente do inicial, o que pode ser interessante (BRITO *et al.*, 2006).

A madeira termorretificada tem sua estabilidade dimensional e resistência natural melhoradas (BARREIROS; BELEZIA, 2016). Além disso, a madeira ganha durabilidade quanto aos agentes biológicos, como fungos (MODES *et al.*, 2017), e,

também, tem sua cor uniformizada, valorizando esteticamente o produto final (LOPES *et al.*, 2014).

A termorreificação pode ser utilizada em situações onde os processos que utilizam compostos químicos são proibidos para a madeira, como, por exemplo, na embalagem de alimentos (BRITO *et al.*, 2006).

Os condicionantes do resultado são vários: teor de umidade, temperatura, densidade, composição química, tempo de exposição, fluxo de calor, permeabilidade, condutividade térmica, etc. (PINTO, 2005).

Quanto a atmosfera de aquecimento, na presença de vapor a degradação é favorecida em relação à presença de água líquida, que, por sua vez, é favorecida em relação à atmosfera seca (WANGAARD, 1950 *apud* MODES *et al.*, 2014).

Para cada espécie de madeira a termorreificação deve ocorrer em uma faixa de temperatura diferente, levando em consideração a temperatura de transição vítrea do material (SILVA, 2011).

As estruturas, quando bem projetadas, podem suportar os efeitos negativos causados pelo calor. Placas finas de *wood frame* podem ser protegidas com películas e pinturas isolantes ou placas corta-fogo internas. Já para seções maiores pode ser considerada a seção residual das peças (AUDEBERT *et al.*, 2013).

Em um incêndio, a queima ocorre primeiro superficialmente, mantendo o núcleo do elemento intacto, que é a seção residual. A camada externa, carbonizada, se torna isolante, desacelerando o processo de combustão no interior do elemento (MANRÍQUEZ; MORAES, 2009). A Figura 5 apresenta as faixas de queima em uma seção de madeira.

Figura 5 – Seção carbonizada de madeira.



Fonte: Manriquez; Moraes (2009).

Na seção interna se observa a madeira em seu estado natural, representando a seção residual, cuja temperatura é bem inferior àquela da superfície carbonizada isolante. A base da zona de pirólise e a zona de pirólise encontram-se no intervalo estudado neste trabalho.

Segundo CETEC, 1980 *apud* Campos, 2008, a pirólise, ou processo de carbonização, causa a decomposição térmica da biomassa, fazendo com que os seus componentes sejam exaustivamente degradados. Ocorre liberação de gases, vapores d'água, líquidos orgânicos e formação de resíduo líquido (alcatrão) e sólido (carvão).

Na base do carvão a temperatura já está em 350°C e na camada de carvão em si, em 650 °C. Como já visto, a carbonização ocorre aos 300°C, temperatura máxima deste estudo, de modo que houve análise da pirólise da madeira (processo antes da carbonização completa).

Aos 330 °C a hemicelulose é completamente degradada e aos 370°C ocorre a destruição da celulose. A partir desta temperatura ocorre a produção de carvão vegetal, que está fortemente atrelada a deterioração da lignina (BRITO *et al.*, 2006). A Tabela 1 resume os efeitos do calor por faixa de temperatura.

Tabela 1 – Efeitos causados pela temperatura na madeira.

Fase	Temperatura	Fenômenos
I	Até 200°C	Processo denominado pirólise lenta; Liberação de vapor d'água e gases; A madeira não se igniza; Algumas reações exotérmicas de oxidação; Mudança de cor.
II	200 a 280°C	Aumento de reação química e eliminação de gases; Reações exotérmicas primárias sem inflamação; Temperatura de ignição; Fase conhecida como a pirólise rápida.
III	280 a 380°C	Produção de grandes quantidades de destilados, principalmente ácidos acéticos e metanol; O resíduo final dessa fase já é carvão vegetal, mas que ainda apresenta compostos volatilizáveis em sua estrutura; Fase exotérmica.
IV	380 a 500 °C	Redução da emissão de gases; Produção de ácido acético, metanol, alcatrão e diversas substâncias gasosas condensáveis; Perda de massa da ordem de 70%; Fase exotérmica.
V	> 500°C	Término da carbonização e início da gaseificação do carvão; O carvão é o principal resíduo; No interior da madeira permanecem as temperaturas das fases I, II, e III; Fase exotérmica.

Fonte: Manriquez; Moraes (2009).

A velocidade com que a madeira se transforma em carvão é chamada de taxa de carbonização (MANRÍQUEZ; MORAES, 2009), que é influenciada por vários fatores, como massa específica, teor de umidade, as dimensões da peça, a forma da seção transversal e a intensidade do fluxo de calor (BUCHANAN, 2001; MIKKOLA, 1990; NJANKOUO; DOTREPPE; FRANSSEN, 2004; PINTO, 2005; SCHAFFER, 1967; WHITE, 1988 *apud* MANRÍQUEZ; MORAES, 2009). A taxa de carbonização é menor para espécies de madeira com maior massa específica, pois há mais material para queimar em um mesmo espaço físico (MIKKOLA, 1990; NJANKOUO; DOTREPPE; FRANSSEN, 2004 *apud* MANRÍQUEZ; MORAES, 2009). O teor de umidade influencia no sentido de que retarda o processo de combustão enquanto não há a evaporação total da água (SCHAFFER, 1967; WHITE, 1988; MIKKOLA, 1990; NJANKOUO; DOTREPPE; FRANSSEN, 2004 *apud* MANRÍQUEZ; MORAES, 2009).

O tamanho da peça dita a sua superfície específica, quanto maior ela é, maior é a taxa de carbonização, assim, peças pequenas possuem taxas maiores (MANRÍQUEZ; MORAES, 2009). Elementos retangulares apresentam maior taxa do que aqueles de formato circular, pois as arestas aumentam a área de exposição (PINTO, 2005).

Também vale dizer que, no início do processo de queima, a taxa é maior do que ao fim, pois ela se estabiliza com a formação dos primeiros milímetros de carvão (PINTO, 2005).

2.5 TRABALHOS RECENTES

2.5.1 Moraes, Rodrigues e Correia (2011)

Neste trabalho, os autores estudaram a influência direta da temperatura em ligações de corte duplo, parafusadas com um e três conectores, e confeccionadas com a madeira *Pinus taeda*. Os corpos-de-prova com teor de umidade igual a 12% foram separados em grupos de densidade volumétrica mais próxima. Foram realizados ensaios de embutimento da madeira e compressão paralela às fibras das ligações, em temperaturas entre 20 e 230 °C. Cada grupo era ensaiado em uma temperatura. Após o embutimento, foi realizado ensaio do teor de umidade com as peças.

Percebeu-se um comportamento linear inverso entre o teor de umidade e o aumento da temperatura, sendo identificado um padrão em sua redução. A resistência à compressão das ligações, tanto de um quanto de três parafusos, apresentou uma curva com capacidade de carga por temperatura semelhante a da compressão paralela às fibras.

Em todas as temperaturas, exceto em 50 °C, a resistência da ligação parafusada com três conectores foi aproximadamente três vezes superior à parafusada com um parafuso. Aos 50 °C, as ligações com um parafuso apresentaram redução da resistência de 47,2%, e as de três, uma redução de 41,2%

em relação à temperatura ambiente, ponto em que elas mais diferiram, ainda que pouco.

Aos 100 °C, a madeira de *P. taeda*, de modo geral, apresentou um comportamento muito plástico. Dos vinte e um corpos-de-prova ensaiados, incluindo as peças do embutimento e as ligações de um e três parafusos, apenas um falhou por fendilhamento. Nos ensaios em outras temperaturas, ao menos cinco apresentaram fendas.

Aos 150 °C, os autores observaram uma tendência de aumento da capacidade de carga em comparação aos 100 °C.

Aos 200 °C, houveram dezoito falhas por fendilhamento. Entretanto, a capacidade de carga voltou a diminuir para todos os ensaios.

2.5.2 Manríquez (2012)

Manríquez (2012) avaliou o comportamento em altas temperaturas de três espécies de madeira: *P. taeda*, *Eucalyptus saligna* e *Schizolobium amazonicum* visando o desenvolvimento de coeficientes de modificação aplicáveis à norma brasileira, de modo que a temperatura fosse considerada nas resistências em projetos estruturais.

Foram ensaiadas três amostras, compostas por 2025 corpos-de-prova com umidade de 12%: 750 de *P.taeda*, 750 de *E. saligna* e 525 de *S. amazonicum*, em temperaturas entre 20°C e 230°C, obtendo as seguintes resistências: compressão paralela às fibras; flexão estática; cisalhamento e embutimento paralelo e perpendicular às fibras.

Os aquecimentos ocorreram por tempos entre 150 e 210 min conforme tamanho dos corpos-de-prova. Então, foram rompidos de acordo com os tipos de resistência sempre dentro de câmara térmica.

Os coeficientes de modificação em função da temperatura das resistências à compressão, à flexão, ao cisalhamento e ao embutimento foram determinados a partir dos valores característicos normalizados (valor de resistência à temperatura dividido pelo valor aos 20°C, obtidos para cada nível de temperatura das propriedades mecânicas estudadas.

Como esperado, o autor observou que o teor de umidade diminuiu linearmente com o aumento da temperatura do ensaio. Todos os ensaios de resistência apresentaram aumento de capacidade, mas cada um em uma temperatura diferente.

No ensaio de compressão paralela às fibras o aumento ocorreu aos 150 °C. No ensaio da flexão elástica, o aumento de resistência foi mais sutil, aos 190 °C. No ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, a melhora se deu aos 130 °C. Já para o ensaio de embutimento paralelo às fibras houve um aumento de resistência nas temperaturas de 130 e 160 °C.

Foram obtidos coeficientes de modificação diferentes para duas faixas de temperatura. A primeira faixa está entre 20 e 70 °C, e seus coeficientes podem ser aplicados diretamente em estruturas ou elementos de estruturas em madeira. Como já visto, telhados podem chegar a este nível de calor dependendo da temperatura da atmosfera.

A segunda faixa está entre 70 e 230 °C, onde já se considera incêndio ou pré-incêndio. Os coeficientes desta faixa podem ser aplicados se combinados com outras propriedades térmicas e físicas da madeira para estimar seu comportamento mecânico. Tal estimativa pode ser feita por meio de modelos numéricos avançados.

2.5.3 Audebert *et al.* (2012)

Os autores analisaram a influência de dois tipos de conectores, das posições dos mesmos, e da distribuição de carga entre eles na resistência de ligações duplas com uma peça central de aço e duas peças laterais de madeira laminada colada, em situação de exposição ao fogo. As peças foram testadas para a tensão paralela às fibras. Foram utilizados parafusos e cavilhas metálicas, em variados tamanhos, em configurações diferentes de conexões.

Em todas as ligações sempre houve a presença de um parafuso, impedindo a separação das mesmas. A principal diferença entre os conectores, ainda de acordo com os pesquisadores, é a folga na furação. Para parafusos, até um milímetro, para as cavilhas, zero. Essa folga reduz as características mecânicas da ligação, pois altera as tensões na região. Eles também falam sobre a presença de

arruelas e porcas no parafuso: ocasionam uma carga normal no conector. Foram utilizados termopares.

As divergências entre os conectores poderiam provocar reações diferentes em relação ao fogo. Audebert *et al.* (2012) aprimoraram o conhecimento nesse sentido: criou-se um modelo computacional do comportamento de ligações de madeira em fogo validado em laboratório.

Foi programado um modelo computacional, a fim de prever o tempo para falha das conexões e a distribuição de carga entre os conectores das ligações, o que não seria possível medir em ensaio. Foram realizados experimentos que validassem o modelo.

Através do modelo, percebeu-se que, ao início dos ensaios, de 30 minutos aproximadamente, os conectores das extremidades mais distantes da aplicação de força carregavam as maiores cargas – como já visto em outras bibliografias, caso fossem parafusos, carregavam cargas ainda maiores. Já os conectores do meio carregavam cargas equivalentes entre si.

Entre sete e oito minutos passados de ensaio, no entanto, parafusos passaram a suportar menos carga do que as cavilhas, tendo, os parafusos, alcançado 100 °C nesse tempo, enquanto as cavilhas apenas 50 °C, quanto mais tempo se passava em contato com o fogo, menos os parafusos resistiam.

A temperatura mais alta no parafuso é explicada pelos autores: as arruelas e porcas tornam o parafuso mais suscetível ao calor. A área das cavilhas exposta é muito menor. Estando o parafuso mais aquecido, ele perde mais resistência do que o outro tipo de conector, além de degradar mais a madeira em seu entorno. Desse modo, o parafuso transfere a carga suportada por ele às cavilhas, assumindo um papel negativo nessa situação.

Para comprovar essa ideia, foram ensaiadas ligações com apenas cavilhas. Estas apresentaram maior resistência em situação de fogo do que as ligações que possuíam parafuso. Sendo o parafuso necessário para a não separação da ligação, este deve estar na posição onde receberá menos carga, tendo sua importância maior baseada na junção das peças. Ele deve estar o mais distante da extremidade contrária à aplicação de carga.

2.5.4 Schneid *et al.* (2014)

Os autores avaliaram o comportamento de ligações duplas de madeira *Eucalyptus grandis* com configurações de dois e três parafusos em temperaturas entre 23 °C e 200 °C. As peças foram separadas em cinco grupos de densidade volumétrica mais próxima, cada grupo sendo ensaiado em uma temperatura. Aos 12% de umidade, foram realizados ensaios de compressão paralela às fibras das ligações. A caracterização da espécie foi retirada de outra bibliografia.

As ligações foram pesadas antes e depois do ensaio. Lembrando que foram aquecidas previamente em estufa antes de irem para a prensa. Desse modo observou-se a redução da água na madeira. O teor de umidade apresentou queda linear inversamente proporcional ao aumento da temperatura.

Aos 100 °C, nenhum dos quatorze corpos-de-prova apresentou fendilhamento, ou seja, comportamento plástico. Aos 150 °C houve melhora da resistência à compressão paralela às fibras. Aos 200 °C, sete ligações romperam por fendilhamento e a resistência voltou a cair.

É válido, ainda, destacar que as ligações com dois parafusos apresentaram redução média de 46% da resistência, enquanto aquelas com três apresentaram 36%. Não houve relação de proporcionalidade entre as resistências e o número de conectores.

Também se notou que o Eurocode 5:2004, parte 1-1 indicou um dimensionamento para que as ligações resistissem a uma carga maior do que elas realmente suportaram, enquanto a NBR 7190:1997 fez o contrário.

2.5.5 Lopes *et al.* (2014)

Estes autores estudaram a densidade e o teor de umidade da madeira de *Tectona grandis* frente ao processo de temoretificação aos 180 e 200 °C. Os corpos-de-prova de 15,0 x 7,5 x 2,0 cm foram obtidos a partir de toras de árvores de teca de 12 anos. Houve a separação em dois grupos: o primeiro com predominância de madeira de cerne e o segundo com predominância de alburno.

Houveram quatro etapas de termorretificação, que ocorreu em forno mufla elétrico laboratorial. A primeira etapa foi o aquecimento do material até 100 °C por duas horas. A segunda foi o alcance da temperatura da termorretificação propriamente dita em meia hora. A terceira foi um período de duas horas e trinta minutos nas temperaturas finais. E a quarta etapa foi o resfriamento por uma hora.

A madeira do cerne apresentou uma maior redução da densidade: cerca de 8,67% de decréscimo médio. A madeira do alburno apresentou decréscimo de 6%. Isso pode ser explicado pelo fato do cerne possuir uma maior quantidade de extrativos, os quais se volatilizam durante o aquecimento, havendo então maior perda de massa. Os extrativos são compostos orgânicos com características comuns.

Quanto ao teor de umidade, a madeira do cerne sofreu uma redução de 53,5%. Enquanto a madeira do alburno sofreu redução de 47%. Não há diferença significativa.

2.5.6 Barreiros e Belezia (2016)

Os autores estudaram o comportamento de corpos-de-prova de *Pinus elliottii* em formato de tábuas de 40 cm de comprimento, 11 cm de largura e 2,54 cm de espessura sem defeitos. Os topos das tábuas foram seladas com pasta de silicone a fim de evitar a perda de água pelas extremidades. As propriedades físicas estudadas foram: massa específica, retratibilidade linear, inchamento linear e volumétrico.

Para a termorretificação foi utilizada uma estufa elétrica. Inicialmente os corpos-de-prova passaram por um processo de secagem de 14 horas a 100 °C para evitar problemas de expansão de vapor de água e rompimento das paredes celulares posteriormente.

Então, a uma taxa de 1,34 °C/min, conforme bibliografia, a temperatura foi elevada até as temperaturas finais de 140, 160, 180 e 200 °C. As tábuas permaneceram expostas à estas temperaturas por duas horas e meia. O resfriamento foi feito dentro da estufa desligada, até que a mesma atingisse 30 °C.

Os corpos-de-prova para estudo do inchamento foram então saturados em água para aplicação da metodologia de medição desta característica.

Não ocorreram grandes mudanças em relação a massa específica, com exceção dos tratamentos aos 180 °C, onde ela foi maior. Isso era esperado de acordo com a literatura, pois há aumento da lignina conforme a redução da holocelulose. Quanto a retratibilidade, houve uma melhora na estabilidade dimensional. Houve um aumento da retratibilidade aos 180 °C.

Ocorreu uma tendência de redução de inchamento linear e volumétrico, visto que quanto maior a temperatura menos higroscópica se torna a madeira. Houve também uma melhora estética da coloração das tábuas. Apesar do leve encanoamento da madeira não houve grandes rachaduras. O melhor comportamento ocorreu na retificação aos 180 °C.

Nesse sentido, percebe-se a grande complexidade do comportamento da madeira. São muitos fatores que determinam seu desempenho. Em algumas situações a exposição ao calor pode ser algo vantajoso, em outras, pode ser fortemente prejudicial.

Estudar a influência da temperatura é importante, devido aos diferentes resultados que podem ser obtidos. Ampliar o conhecimento nessa área é importante também para que o preconceito com a madeira seja desfeito.

Diante disso, apresentam-se os materiais e métodos utilizados no presente estudo, a fim de diminuir o preconceito com o uso de estruturas de madeira.

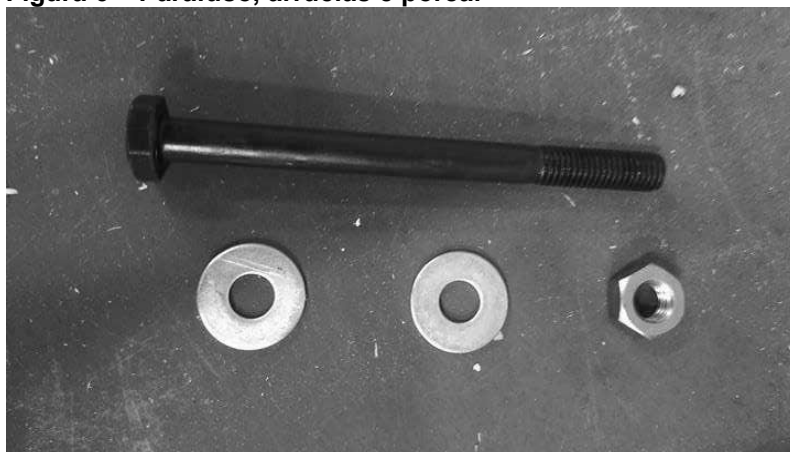
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para realização deste trabalho optou-se pela utilização de madeira *Pinus* sp., devido à sua disponibilidade no comércio local e utilização em estruturas de madeira de pequeno porte.

Para ligação das peças foram utilizados parafusos do tipo sextavado 8.8, enegrecido de têmpera, de rosca parcial de 10 mm de diâmetro (Figura 6), da marca CISER, com tensão de escoamento característica de 640 N/mm² e tensão de ruptura de 800 N/mm², sendo esses dados fornecidos pelo fabricante.

Figura 6 – Parafuso, arruelas e porca.



A têmpera é um processo de aquecimento seguido por resfriamento rápido, a intenção deste é o aumento da dureza e resistência do aço.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Seguindo NBR 7190:1997, as amostras foram retiradas de um lote homogêneo, cujo volume não foi superior a 12 m³. Os corpos-de-prova foram extraídos aleatoriamente ao longo do lote e isentos de defeitos: distaram, no mínimo,

cinco vezes sua menor dimensão, ou 30 cm das extremidades da peça. Foi adotada a caracterização simplificada, seis corpos-de-prova, por se tratar de uma espécie conhecida. Senão a caracterização seria a mínima, com 12 corpos-de-prova.

Foram realizados, previamente, os ensaios de caracterização seguindo a norma brasileira: ensaio do teor de umidade e ensaio da resistência à compressão paralela às fibras.

3.2.1 Ensaio do teor de umidade conforme NBR 7190:1997

Para este ensaio, foram utilizados seis corpos de prova de seção retangular 2,0 x 3,0 cm e comprimento, ao longo das fibras de 5,0 cm. A massa úmida dos seis corpos-de-prova foi determinada utilizando uma balança de precisão (Figura 7). Em seguida os corpos-de-prova foram submetidos à secagem em estufa a $(103 \pm 2) ^\circ\text{C}$ até ocorrer variação de massa de duas medidas consecutivas de, no máximo, 0,5%, sendo 24 horas suficientes, sendo então determinada a massa seca das amostras.

Figura 7 – Ensaio do teor de umidade.



O teor de umidade de cada peça foi calculado com a Equação (12) e a média aritmética dos valores (U_m) para representação do lote.

$$U_i = \frac{m_i - m_s}{m_s} 100 \quad (12)$$

Onde:

U_i : teor de umidade da peça, em %;

m_i : massa inicial, em g;

m_s : massa seca, em g.

3.2.2 Ensaio resistência à compressão paralela às fibras conforme NBR 7190:1997

Para determinação da resistência à compressão paralela às fibras foram utilizados corpos-de-prova com seção de 5,0 x 5,0 cm e comprimento de 15,0 cm ao longo das fibras, divididos em dois grupos de seis peças cada: um grupo em umidade natural e outro seco em estufa por 24 horas a temperatura de 100 °C (Figura 8).

Figura 8 – Dois grupos de ensaio de compressão.



Este ensaio foi realizado em prensa hidráulica, a uma taxa de carregamento de 10 MPa/min, até a ruptura da madeira, conforme Figura 9.

Figura 9 – Compressão paralela às fibras.



A partir da força máxima aplicada, foi calculada a resistência de cada peça conforme a Equação (13). O valor característico ($f_{c0,k}$), que representa o lote, é calculado pela média dos valores de cada peça.

$$f_{c0,i} = \frac{F_{c0,m\acute{a}x.}}{A} \quad (13)$$

Onde:

$f_{c0,i}$: resistência à compressão paralela às fibras da peça, em MPa;

$F_{c0,m\acute{a}x.}$: força máxima aplicada ao corpo-de-prova, em N;

A: área da seção transversal da peça, em mm².

A partir dos valores de $f_{c0,k}$ e U_m (média aritmética dos valores de teor de umidade), pode ser feita a correção da resistência natural para o teor de umidade padrão de 12%, conforme Equação (14). Essa correção apenas pode ser feita para valores entre 10 e 20%.

$$f_{c0,12} = f_{c0,k} \left[1 + \frac{3(U_m - 12\%)}{100} \right] \quad (14)$$

Onde:

$f_{c0,12}$: resistência característica à compressão paralela às fibras em 12% de umidade, em MPa.

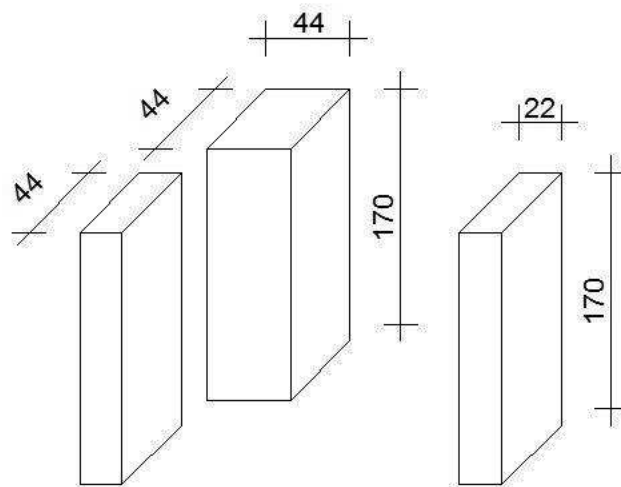
$f_{c0,k}$: resistência característica à compressão paralela às fibras, em MPa.

U_m : teor de umidade médio do lote, em %;

3.3 EXPERIMENTAÇÃO DAS LIGAÇÕES

Para os ensaios mecânicos de ruptura das ligações foram utilizados 36 corpos-de-prova, visto que as ligações foram distribuídas em seis grupos de seis itens cada. Cada corpo-de-prova foi composto por três talas de madeira, cujas dimensões se encontram na Figura 10, sendo as talas laterais aproximadamente iguais.

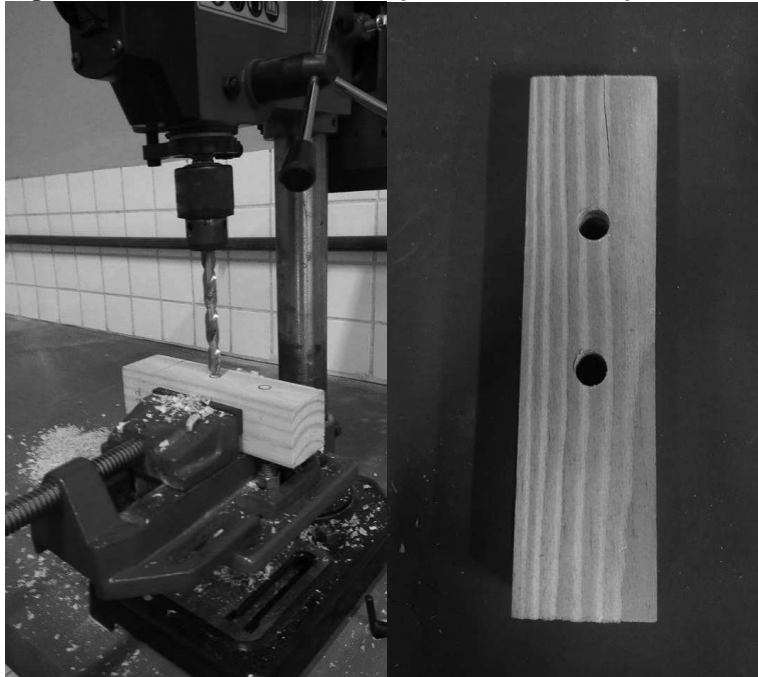
Figura 10 – Dimensões das talas de madeira utilizadas (em mm).



As ligações foram montadas com dois parafusos, seguindo os trabalhos de Schneid *et al.* (2014) e de Moraes, Rodrigues e Correia (2012).

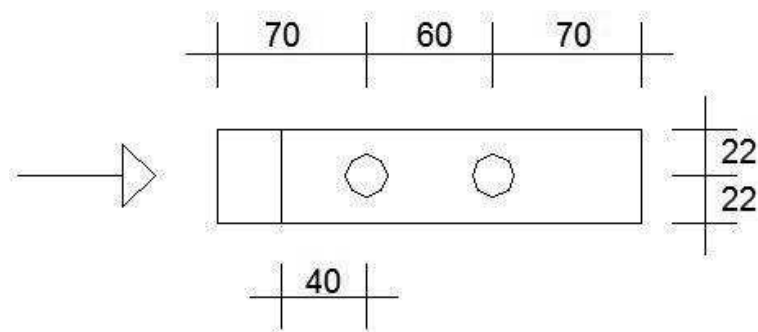
Para montagem foi realizada uma pré-furação com broca com diâmetro do conector acrescido de 0,5 mm. Os furos foram feitos com parafusadeira presa à bancada, conforme Figura 11.

Figura 11 – Furação das peças para encaixe dos parafusos.



A posição dos parafusos foi definida seguindo as recomendações mínimas e máximas da NBR 7190:1997 e do Eurocode 5:2004, parte 1-1. No entanto, só puderam ser adotadas as medidas da direção paralela às fibras e à força, porque as peças disponíveis na madeira não tinham a largura suficiente para que os parafusos distassem, entre si, no mínimo três vezes seu diâmetro na outra direção. O resultado está na Figura 12.

Figura 12 – Configuração das ligações (em mm).



3.4 TRATAMENTOS DAS LIGAÇÕES

Os corpos-de-prova foram divididos em seis grupos, sendo ensaiados conforme temperatura e tempo de exposição apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Tratamentos das ligações de madeira.

Grupo	Temperatura	Tempo
1	Ambiente com umidade de compra ($U > 15\%$)	-
2	Madeira seca em estufa à $(103 \pm 2) ^\circ\text{C}$	24 horas
3	até $230 ^\circ\text{C}$	meia hora
4	até $243 ^\circ\text{C}$	uma hora
5	até $261 ^\circ\text{C}$	uma hora e meia
6	até $278 ^\circ\text{C}$	três horas

O forno estava regulado para alcançar $300 ^\circ\text{C}$, no entanto, o mesmo era ligado no início do ensaio, estando em temperatura ambiente. Ocorreu um aquecimento gradativo das peças, que não chegaram a alcançar esta temperatura de fato durante os tempos de ensaio adotados.

Escolheu-se trabalhar com a temperatura mais alta permitida pelo equipamento ($300 ^\circ\text{C}$) para que efeitos mais drásticos fossem percebidos, visto que a partir de $65 ^\circ\text{C}$ já ocorrem efeitos permanentes no material.

Assim sendo, o presente trabalho estudou a madeira em três fases. Na primeira fase, até $200 ^\circ\text{C}$, acontece a pirólise lenta, com liberação de vapor de água e de gases, também ocorre oxidação decorrente da presença de oxigênio e há mudança de cor (Grupo 2).

Na segunda, entre 200 e $280 ^\circ\text{C}$, a pirólise ocorre mais rapidamente e a liberação de vapor de água e gases se intensifica, já pode acontecer ignição e surgir carvão (Grupos 3, 4 e 5).

Ocorre também o início da terceira fase, entre 280 e $380 ^\circ\text{C}$, que é exotérmica, há produção de grande quantidade de destilados e já acontece a formação de carvão vegetal (Grupo 5).

O primeiro grupo foi ensaiado naturalmente, com umidade de compra. Os demais grupos tiveram suas talas secas em estufa por 24 horas aos $100 ^\circ\text{C}$ antes da montagem dos corpos-de-prova. Na Figura 13 são apresentadas as talas de madeira durante processo de secagem.

Figura 13 – Secagem das talas de madeira.



O segundo grupo foi ensaiado em condição seca. Os outros quatro grupos foram submetidos a tempos diferentes de exposição ao calor dentro de um forno regulado em temperatura aproximada de 300 °C (Figura 14). Apesar do forno ser regulado para temperatura não é garantida que as ligações também chegassem a este valor, visto que é necessária a homogeneização da mesma.

Para gerar a temperatura, foi utilizado um forno elétrico industrial com um termostato instalado na parte externa, de forma a determinar a temperatura, conforme Figura 14

Figura 14 – Ligações em processo de aquecimento.



Para monitoramento da temperatura na madeira foi utilizado um termômetro de infravermelho (Figura 15) sendo medida a temperatura das peças logo após a abertura da porta do forno. Na secagem em estufa não foi utilizado termômetro devido a maior precisão do equipamento.

Figura 15 – Termômetro por infravermelho.



Após submetidas à temperatura elevada, as ligações permaneceram em temperatura ambiente no laboratório até a data de ruptura, sendo este tempo de aproximadamente um mês. Para preservação da estrutura seca obtida, os corpos-de-prova foram armazenados em embalagens plásticas estanques.

3.5 INSTRUMENTAÇÃO E EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE LIGAÇÕES

Os ensaios foram instrumentados quanto à carga aplicada, através da célula de carga instalada na prensa, e deslocamentos verticais da ligação, utilizando extensômetro em uma cantoneira instalada no centro de gravidade da ligação, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Ensaio das ligações de madeira.



As peças foram carregadas com velocidade igual a 2 mm/min, conforme Schneid *et al.* (2014), sendo determinada a ruptura quando o deslocamento vertical atingisse 10 mm ou quando ocorresse o fendilhamento da madeira.

3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos experimentalmente foram utilizados para uma comparação geral dos efeitos da temperatura entre os tratamentos, através de uma análise de variância (ANOVA) dos resultados. Também foi feito o teste de Tukey para comparação par a par dos mesmos resultados.

Além disso, os valores obtidos foram comparados com as estimativas calculadas utilizando as equações das normas NBR 7190:1997 e Eurocode 5:2004, parte 1-1.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 TEOR DE UMIDADE

O lote de madeira utilizado apresentou teor de umidade entre 10 e 20%, podendo ser usada a Equação 14, de correção para a resistência à compressão paralela às fibras em umidade de compra para 12%. A umidade média do lote de madeira ficou em 14,50% com desvio padrão de 1,74%. Na Tabela 3 são apresentados os resultados do ensaio de teor de umidade.

Tabela 3 – Resultados do ensaio do teor de umidade.

CP	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Teor de umidade (%)
1	24,98	21,72	15,01
2	39,88	34,31	16,23
3	39,60	34,07	16,23
4	23,24	20,27	14,65
5	30,30	27,02	12,14
6	31,48	27,93	12,71
Média			14,50
Desvio Padrão			1,74

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos para compressão paralela às fibras para corpos-de-prova em umidade natural e corpos-de-prova secos por 24 horas em estufa. Percebe-se que a resistência seca foi maior do que a resistência natural em 65,94%. Sendo a resistência natural média 79,03 kN e a resistência seca média 131,14 kN, com desvios padrão de 6,59 e 27,19, respectivamente.

Após o ensaio de compressão, os corpos-de-prova foram submetidos à secagem até a constância de massa, obtendo-se o mesmo teor de umidade dos corpos-de-prova ensaiados anteriormente.

Tabela 4 – Compressão paralela às fibras.

Umidade natural		Corpos-de-prova secos	
CP	Força (kN)	CP	Força (kN)
1.1	78,65	2.1	124,20
1.2	85,85	2.2	166,20
1.3	78,4	2.3	86,65
1.4	83,9	2.4	146,20
1.5	80,4	2.5	121,50
1.6	67	2.6	142,10
Média	79,03	Média	131,14
Desvio padrão	6,59	Desvio padrão	27,19

Na Figura 17 está um dos corpos-de-prova retirado da estufa, nota-se a saída de seiva devido ao calor. Na Figura 18 estão os corpos-de-prova após ruptura na prensa.

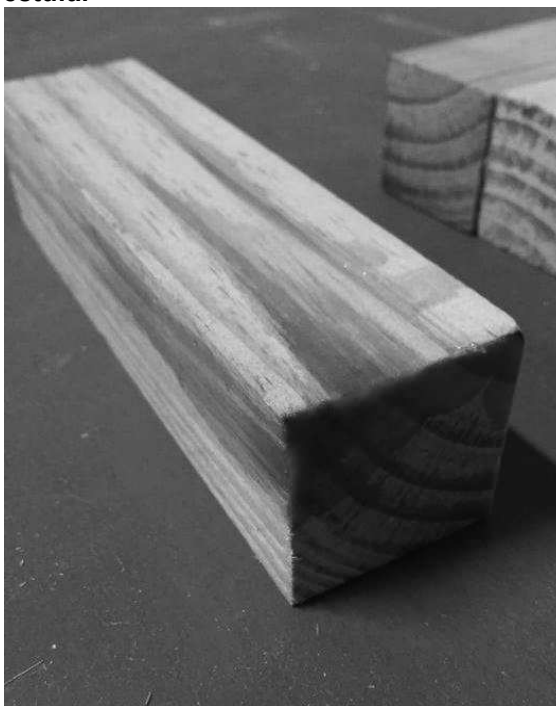
Figura 17– Corpo-de-prova recém saído da estufa.

Figura 18 – Corpos-de-prova após ruptura na prensa.



4.3 RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES

4.3.1 Valores das resistências

No Apêndice A constam os resultados individuais de ruptura de todos os corpos-de-prova ensaiados. Abaixo os resultados são discutidos a partir das médias e desvios padrão dos grupos.

a) Ligações do Grupo 1 - unidade de compra:

Todos os valores de resistência ficaram próximos, sendo sua média 37,84 kN e o desvio padrão 3,76 kN. Os deslocamentos máximos, cuja média foi de 6,07 mm, também não divergiram muito, visto que seu desvio padrão ficou em 1,89 mm.

Na Figura 19 estão as ligações naturais antes da ruptura e na Figura 20 após ensaio.

Figura 19 – Ligações do Grupo 1 antes do ensaio.



Figura 20 - Ligações do Grupo 1 após o ensaio de ruptura.



Todas as rupturas ocorreram por fendilhamento da madeira, sendo a maioria das rupturas nas talas laterais. Apenas duas ligações romperam na tala do meio (a primeira e a quarta da esquerda para direita), e pode ser visto que as talas laterais destas ligações apresentam coloração mais escura, característica que está relacionada com a maior densidade do material.

b) Ligações do Grupo 2 - estado seco:

As peças destas ligações foram secas antes da furação e da inserção dos parafusos. Foi medido seu teor de umidade após secagem, que se aproximou do valor do primeiro ensaio.

As rupturas ocorreram pelo fendilhamento da madeira e o valor de resistência médio foi de 47,05 kN, o desvio padrão foi de 6,78 kN, assim os resultados não são tão homogêneos quanto do Grupo 1, cujo desvio padrão foi menor, 3,76 kN. Já os deslocamentos ficaram muito próximos, com um desvio padrão de 0,30 mm, e com média foi de 5,02 mm.

A resistência média foi maior do que o valor do Grupo 1 em 12,34%, que estava em estado natural, ou seja, a exposição à temperatura teve efeito satisfatório sobre a resistência.

c) Ligações do Grupo 3 – aquecimento por meia hora:

As peças destas ligações foram secas antes da furação e inserção dos parafusos. Já montadas, foram submetidas ao aquecimento gradativo em forno regulado a 300 °C, alcançando 230 °C como temperatura máxima medida nas peças do fundo ao final do ensaio. Nas peças da frente a temperatura máxima foi de 150 °C, o que pode ser explicado pela maior perda de calor na parte frontal do equipamento, ocorrida no exato momento da abertura da porta para medição com termômetro de infravermelho. Na Figura 21 estão as ligações recém saídas do forno.

Figura 21 – Ligações do Grupo 3 após aquecimento.



Percebeu-se a acentuação da cor da madeira, que adquiriu um tom alaranjado decorrente da saída dos extrativos. Depois as ligações foram resfriadas para o ensaio de ruptura.

A resistência residual média foi de 48,95 kN, com desvio padrão de 4,22 kN, sendo a resistência maior do que a resistência das peças simplesmente secas do Grupo 2 em 4,04% e das peças naturais do Grupo 1 em 29,36%. A temperatura teve efeito positivo sobre a resistência mecânica. Já o deslocamento máximo teve média de 4,52 mm, e os valores não ficaram distantes, sendo o desvio padrão de 1,26 mm. Na Figura 22 estão as ligações após ensaio de ruptura.

Figura 22 – Ligações do Grupo 3 após ensaio de ruptura.



Devido ao teor de umidade mais baixo, as rupturas foram mais abruptas, com menores deformações, sempre ocorrendo pelo fendilhamento da madeira. A média de deslocamento foi de 4,52 mm, enquanto para o Grupo 1 foi 6,07 e para o Grupo 2 foi 5,02. Além disso, em algumas ligações as talas laterais se soltaram na ruptura.

d) Ligações do Grupo 4 – aquecimento por uma hora:

Estas ligações também foram secas antes da furação e inserção dos parafusos. Então, após montadas, foram aquecidas por uma hora e depois resfriadas para ruptura. O forno estava regulado para alcançar, também, 300 °C, estando em temperatura ambiente no tempo zero.

A maior temperatura medida, por meio do termômetro de infravermelho, foi de 243 °C no fundo do forno. Novamente a parte frontal apresentou um valor menor,

neste caso de 195 °C. Na Figura 23 estão os corpos-de-prova recém saídos do forno.

Figura 23 – Ligações do Grupo 4 após aquecimento.



Foi percebida forte alteração da cor da madeira. O corpo-de-prova de número 5.6 sofreu a formação de uma casca de seiva derretida, também surgiu uma brasa em uma de suas talas laterais. O corpo-de-prova 5.5 teve um afrouxamento dos parafusos causado pela retração da madeira.

A resistência residual média foi de 49,10 kN, com desvio padrão de 8,29 kN, bem mais alto do que os anteriores. Retirando os valores de resistência dos corpos-de-prova 4.4 e 4.3, 10 kN maior do que a média e 10 kN menor do que a média, respectivamente, a nova média fica 49,26 kN e o desvio padrão fica 5,02 kN.

A resistência de 49,26 kN foi maior do que a do Grupo 3 (aquecimento por meia hora) em 0,63%, ou seja, quase não há diferença. Em relação ao Grupo 2 (estado seco) houve melhora de 4,70%. Já em relação ao Grupo 1 (umidade natural) houve aumento de resistência de 30,20%. Já o deslocamento máximo teve média de 5,04 mm, e os valores não ficaram distantes, sendo o desvio padrão de 0,90 mm.

Observa-se que o Grupo 4 teve uma média de resistência ainda maior do que os grupos anteriores, sendo a influência da exposição à alta temperatura extremamente positiva. Na Figura 24 estão as ligações após ensaio, percebe-se que as rupturas ocorreram na madeira e em nenhum momento nos parafusos.

Figura 24 – Ligações do Grupo 4 após ensaio de ruptura.



e) Ligações do Grupo 5 – aquecimento por uma hora e meia:

As talas de madeira foram secas previamente, então foram montadas as ligações, que, por sua vez, foram expostas a uma hora e meia de calor e resfriadas para ruptura. O aquecimento foi gradativo, estando o forno regulado para 300 °C e iniciando o processo em temperatura ambiente.

A maior temperatura medida, ao final do ensaio, foi de 261 °C no fundo do forno, mais próxima da temperatura de carbonização (300 °C) do que os grupos anteriores. Na parte frontal a temperatura máxima obtida foi de 220 °C.

Na Figura 25 se encontram as ligações saídas do aquecimento. A cor já é predominantemente preta. Os parafusos não afrouxaram e não houve surgimento de brasa. Porcas ganharam tom acobreado.

Figura 25 – Ligações do Grupo 5 após aquecimento.



A resistência residual média ficou em 33,93 kN com desvio padrão de 5,64 kN. Nesse ponto a resistência começou a cair em relação aos grupos anteriores, estando mais baixa até que a resistência do Grupo 1 (umidade natural) em 10,33%. A influência da exposição ao calor passou a ser negativa.

Não houve foto após ensaio, mas todas as rupturas ocorreram pelo fendilhamento da madeira.

f) Ligações do Grupo 6 – aquecimento por três horas:

As peças de madeira foram secas, então foram montadas as ligações, estas foram submetidas a três horas de aquecimento em forno regulado a 300 °C, iniciando em temperatura ambiente. A temperatura máxima medida foi de 278 °C, na parte do fundo do forno. Na Figura 26 estão os corpos-de-prova saídos do aquecimento.

Figura 26 – Ligações do Grupo 6 após aquecimento.



Superficialmente a madeira está carbonizada. As porcas ganharam aspecto enegrecido e os parafusos afrouxaram consideravelmente. Corpos-de-prova 6.1 e 6.6 (nas extremidades) tiveram formação de casca de seiva derretida. Ligações 6.5 e 6.6 tiveram formação de brasa, conforme a literatura esperava.

A resistência residual média ficou em 26,34 kN com desvio padrão de 4,89 kN. Esta resistência ficou abaixo da resistência de todos os grupos, em relação ao Grupo 1 (umidade natural) houve redução de 30,39%, sendo o valor mais baixo do trabalho, assim, a influência da temperatura para três horas de exposição foi negativa. O deslocamento máximo teve média de 3,85 mm com desvio padrão de 0,83 mm, o que está relacionado com a baixa carga aplicada até ruptura, pois os

ensaios eram mais rápidos. Na Figura 27 estão as peças após ensaio de ruptura, percebe-se que elas se desmancharam.

Figura 27 – Ligações do Grupo 6 após ensaio de ruptura.



4.3.2 Comparação entre as resistências

Na Tabela 5 se encontra um resumo dos ensaios e na Figura 28 o gráfico correspondente.

Tabela 5 - Resumo dos resultados dos ensaios de ruptura.

Grupo	Resistência (kN)	Desvio padrão (kN)	Temperatura máxima
1 Umidade natural	37,84	3,76	-
2 Estado seco	47,05	6,78	(103 ± 2)°C
3 Aquecimento de meia hora	48,95	4,22	230°C
4 Aquecimento de uma hora	49,26	5,02	243°C
5 Aquecimento de uma hora e meia	33,93	5,64	261°C
6 Aquecimento de três horas	26,34	4,89	278°C

Figura 28 – Resumo dos resultados do ensaio de ruptura.



O melhor ponto de resistência residual ocorreu no Grupo 4 (aquecimento de uma hora) com 49,26 kN. A temperatura máxima foi de 243 °C, que está dentro da fase de pirólise rápida. Desse modo, o processo de aquecimento pode ser considerado positivo até uma hora de exposição.

Em uma situação de incêndio, onde a estrutura alcançasse as mesmas temperaturas do estudo, haveria tempo mais do que suficiente para evacuação da edificação. Conforme Norma de Procedimento Técnico 008 - Resistência ao fogo dos elementos de construção, estabelecida pelo Corpo de Bombeiros do Paraná (2012), o tempo de resistência da estrutura submetida ao calor deve ser de 15 ou 30 minutos dependendo do seu porte.

Já para uma situação onde a submissão é utilizada como forma de melhoria, a termorreificação, não há diferença significativa entre as resistências do Grupo 2 (estado seco), Grupo 3 (aquecimento de meia hora) e o Grupo 4 (aquecimento de uma hora). Do primeiro para o último a resistência aumenta apenas 4,70%, sendo a secagem suficiente para melhora do desempenho.

No Grupo 5 (aquecimento de uma hora e meia), devido ao tempo e as temperaturas mais altas alcançadas pelas peças (261°C), a resistência residual começa a cair, atingindo 33,93 kN nesse ponto. Assim, a estrutura não suportaria os carregamentos iniciais, visto que a resistência está menor do que a resistência em umidade natural (37,84 kN), sendo o efeito negativo. A degradação da lignina já está mais rápida e o material já está entrando na fase exotérmica.

No ensaio do Grupo 6 (aquecimento de três horas), as peças chegaram a 278 °C e começaram a desmanchar com a aplicação da força, resistindo apenas 26,34kN. Já estando na fase exotérmica, ocorre a formação de carvão vegetal.

4.3.3 Análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey

Foi aplicada análise de variância para os resultados de resistência dos seis grupos, com confiança de 95%, conforme Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Resumo dos dados.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
1 Umidade natural (kN)	6	227,05	37,84	14,10
2 Estado seco (kN)	6	282,30	47,05	46,01
3 Aquecimento de meia hora (kN)	6	293,70	48,95	17,85
4 Aquecimento de uma hora (kN)	6	294,60	49,10	68,78
5 Aquecimento de uma hora e meia (kN)	6	203,55	33,93	31,80
6 Aquecimento de três horas (kN)	6	158,05	26,34	23,87

Tabela 7 – Análise de variância.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2634,08118	5	526,816	15,6164	1,40204E-07	2,53355
Dentro dos grupos	1012,04292	30	33,7348			
Total	3646,1241	35				

Onde:

SQ: soma dos quadrados;

gl: graus de liberdade;

MQ: quadrado médio;

F: estatística F.

Observando a Tabela 6 é perceptível que no caso dos Grupos 2, 4 e 5 a variância está grande, principalmente no Grupo 4. Neste grupo há dois valores que destoam em mais de 10 kN da média, um maior e outro menor, desconsiderando tais valores a média se reajusta para 49,26 kN, como foi feito no item anterior. Nos

Grupos 2 e 5 nenhum valor foi retirado da média, visto que não havia tanta discrepância e o desvio padrão estava adequado.

Quanto a análise de variância, da Tabela 7, observa-se que o valor de F está maior do que o valor de F crítico, recusando-se a hipótese das médias serem iguais, ou seja, há significância no resultado.

Isto é comprovado pelo valor-P: muito inferior ao valor de alfa de 0,05, visto que a confiança é de 95%. Quanto menor o valor-P, melhor o resultado da pesquisa.

Na Tabela 8 se encontra o resultado do teste Tukey, que compara os grupos par a par.

Tabela 8 – Resultado do teste de Tukey.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
Grupo 1		0,09544	0,02664	0,02393	0,8483	0,02009
Grupo 2	3,883		0,9925	0,9894	0,005948	0,00014
Grupo 3	4,685	0,8013		1	0,001396	0,00014
Grupo 4	4,748	0,8646	0,06326		0,00125	0,00014
Grupo 5	1,652	5,535	6,337	6,4		0,2411
Grupo 6	4,85	8,733	9,535	9,598	3,198	

Os valores em rosa são os valores significativos que demonstram os grupos que mais divergiram entre si. Percebe-se que os valores que mais diferem do Grupo 1 (umidade natural) são os valores do Grupo 3 (aquecimento por meia hora), Grupo 4 (aquecimento por uma hora) e Grupo 6 (aquecimento por três horas), porque nos Grupos 2 e 3 a resistência está bem maior do que a resistência do Grupo 1, 29,36% e 30,18%, respectivamente. Já no Grupo 3, a resistência está 30,39% menor.

A relação entre o Grupo 1 (umidade natural) e os Grupos 2 (estado seco) e 5 (aquecimento por uma hora e meia) não é significativa porque no Grupo 2 as peças ainda estavam em processo de ganho de resistência, e no Grupo 5 em processo de perda.

Os valores que mais diferem do Grupo 2 (estado seco) são os valores dos Grupos 5 (aquecimento por uma hora e meia) e 6 (aquecimento por três horas). Os Grupos 1, 3 e 4 apresentam valores similares aos do do Grupo 2 porque este grupo representa a transição da resistência em umidade natural para as resistências maiores. Já nos Grupos 5 e 6 há grande perda de resistência. Essa relação se repete para os Grupos 3 e 4: grupos mais discrepantes são os Grupos 5 e 6.

Desse modo, o trabalho possui resultados significativos, porque os valores dos grupos diferem entre si, provando que o calor influencia na resistência.

4.4 RESISTÊNCIA DAS NORMAS

Os valores de resistência calculados pelas normas NBR 7190:1997 e Eurocode 5 :2004, parte 1-1, se encontram na Tabela 9 comparados aos valores obtidos experimentalmente. Não foram utilizados coeficientes de segurança. A coluna Relação (%) representa em quanto a resistência experimental superou a resistência calculada pela norma.

Tabela 9 – Resistência experimental e resistências teóricas.

Resistência / Grupo	Experimental (kN)	NBR 7190 (kN)	Relação (%)	Eurocode 5 (kN)	Relação (%)
1 Umidade natural	37,84		56,85		43,58
2 Estado seco	47,05		65,29		54,62
3 Aquecimento de meia hora	48,95		66,64		56,39
4 Aquecimento de uma hora	49,26	16,33	66,85	21,35	56,66
5 Aquecimento de uma hora e meia	33,93		51,87		37,08
6 Aquecimento de três horas	26,34		38,01		18,95

Observa-se que ambas as normas possuem caráter conservador. A NBR 7190:1997 apresenta uma resistência de 16,33 kN e o Eurocode 5:2004, parte 1-1, apresenta resistência de 21,35 kN. A resistência experimental em umidade natural, do Grupo 1, foi de 37,84 kN, 56,85% maior do que a da norma brasileira e 43,58% maior do que a da norma europeia.

Mesmo a resistência experimental mais baixa, do Grupo 6, 26,34 kN, foi maior do que as resistências teóricas. A média dos corpos-de-prova expostos a três

horas de alta temperatura superou a expectativa da norma brasileira em 38,01% e a da norma europeia em 18,95%.

As normas levam ao superdimensionamento das estruturas de madeira, assim como já visto na bibliografia.

5 CONCLUSÕES

Percebeu-se que nem sempre o fator temperatura pode ser prejudicial ao desempenho da resistência das estruturas de madeira, podendo ser até mesmo uma maneira de melhorá-lo por meio de termorretrificação.

Na literatura analisada neste trabalho, os efeitos negativos eram obtidos em ensaios quentes de resistência em câmara térmica. Já os efeitos positivos eram obtidos em posterior resfriamento das peças. No entanto, não é comum levar em consideração a resistência mecânica do material nos casos positivos, apenas fatores como teor de umidade, estabilidade dimensional e inchamento. Neste estudo foram misturadas as duas situações: as ligações eram ensaiadas após resfriamento, porém no âmbito da resistência mecânica.

Foi concluído também que a influência do calor pode depender do tempo de exposição em uma mesma temperatura. A partir do estado seco até uma hora de exposição prévia ao calor, o processo estava sendo vantajoso para o desempenho estrutural. Porém não houve grande diferença entre os ganhos, sendo o estado seco suficiente para melhoria da resistência, a exposição até uma hora seria desnecessária em um processo de termorretrificação.

Assim sendo, até uma hora, a estrutura suportaria uma situação de incêndio, sendo tempo suficiente para evacuação de uma edificação, em vista que o tempo determinado pelo Corpo de Bombeiros pode ser 15 ou 30 minutos.

Além disso, conclui-se que as resistências obtidas pelas normas brasileira e europeia são muito conservadoras. Os cálculos superestimam as dimensões estruturais em ambos os casos. É, ainda, válido lembrar que não foram utilizados coeficientes de segurança, devido aos valores de resistência da madeira terem sido obtidos experimentalmente. Caso tivessem sido utilizados, o superdimensionamento teria uma proporção ainda maior.

Assim sendo, mais estudos são necessários sobre o tema. A temperatura pode ter consequência positiva ou negativa, mas a linha que separa as duas situações não é bem definida. A análise da microestrutura é válida, pois a resistência da madeira depende do comportamento interno de seus polímeros e extrativos.

Também se sugere, para trabalhos futuros, a análise da resistência após aquecimento/resfriamento, porém em uma situação onde as ligações permaneçam

expostas ao ambiente, absorvendo umidade, para verificar se o ganho ou perda de resistência se mantêm a longo prazo.

Existe pouco conhecimento sobre a influência das altas temperaturas no comportamento da madeira, em vista de que nem as normas conseguem se aproximar da resistência real.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projetos de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

AUDEBERT, M.; DHIMA, D.; TAAZOUNT, M.; BOUCHAÏR, A. **Behavior of dowelled and bolted steel-to-timber connections exposed to fire**. 2012. Engineering Structures (2012) 39:116-125 doi: 10.1016/j.engstruct.2012.02.010. Elsevier, 2012.

AUDEBERT, M.; DHIMA, D.; TAAZOUNT, M.; BOUCHAÏR, A. **Thermo-mechanical behaviour of timber-to-timber connections**. 2013. Fire Safety Journal (2013) 56:52-64 doi: 10.1016/j.firesaf.2013.01.007. Elsevier, 2013.

BARREIROS, R. M.; BELEZIA, C. M. **Efeito da retificação térmica nas características e propriedades físicas de madeira *Pinus elliottii***. 2016. XV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Curitiba – PR, 2016.

BREYER, D. E.; FRIDLEY, K. J.; COBEEN, K. E.; POLLOCK, D. G. **Design of wood structures ASD/LRFD**. Sexta edição. Nova Iorque: McGraw Hill, 2007. p. 665-770.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. **Comportamento Isolados da Lignina e da Celulose da Madeira Frente a Carbonização**. 2001. Circular Técnica, n. 28, Pbp/3.1.6. Instituto de pesquisas e estudos florestais. Disponível em < <http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr028.pdf> >. Acesso em 11 out. 2017.

BRITO. J.O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO JR, G. **Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* submetida a diferentes temperaturas de termoretificação**. 2006. Cerne, Lavras, v. 12, n. 2, p.182-188. ISSN 2317-6342. Universidade Federal de Lavras, 2006.

CAMPOS, A. C. M. **Carvão de *Eucalyptus*: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR**. 2008. Dissertação de Mestrado – Curso de Mestrado em Engenharia Florestal. Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil, 2008.

CORPO DE BOMBEIROS DO PARANÁ. **NPT 008 – Resistência ao fogo dos elementos de construção**. Curitiba, 2012. 14 p.

EN1995-1-1 (2004) **Eurocode 5: Design of timber structures – part 1-1: General common rules and rules for buildings**, CEN, Brussels, 2004. 121 p.

LOPES, J. O.; GARCIA, R. A.; NASCIMENTO, A. M.; LATORRACA, J. V. F. **Propriedades físicas da madeira de teca termorretrificada**. 2014. Floresta e Ambiente, Seropédica - RJ, v. 21, n. 4, p. 569-577. ISSN 2179-8087. Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2014.

MANRÍQUEZ, M. J. **Coeficientes de modificação das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura**. 2012. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2012.

MANRÍQUEZ, M. J.; MORAES, P. D. **Comportamento da madeira a temperaturas elevadas**. 2009. Ambiente Construído, Porto Alegre - RS, v. 9, n. 4, p. 157-174. ISSN 1678-8621. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2009.

MARTINS, F. **Primeiro prédio em madeira do Brasil é construído na região de Curitiba**. 2016. Gazeta do Povo, Haus. Disponível em < <http://www.gazetadopovo.com.br/haus/arquitetura/primeiro-predio-em-madeira-do-brasil-e-construido-na-regiao-de-curitiba/> >. Acesso em 12 set. 2016.

MEIRELLES, C. R. M.; DINIS, H.; SEGALL, M. L.; SANT'ANNA, S. S. **Considerações sobre o uso da madeira no Brasil em construções habitáveis**. 2007. III Fórum de Pesquisa FAU. Mackenzie. Disponível em < http://www.mackenzie.com.br/fileadmin/Graduacao/FAU/Publicacoes/PDF_IIIForum_a/MACK_III_FORUM_CELIA_REGINA.pdf >. Acesso em 12 set. 2016.

MODES, K. S.; SANTINI, E. J.; VIVIAN, M. A.; GARLET, A. **Influência da termorretrificação na resistência a degradação biológica das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis***. 2017. Ciência Florestal, Santa Maria – RS, v. 27, n. 3, p. 993-1002. ISSN 1980-5098. Universidade Federal de Santa Maria, 2017.

MORAES, P. D.; RODRIGUES, J. P. C.; CORREIA, N. D. F. **Behavior of bolted timber joints subjected to high temperatures**. 2011. European Journal of Wood and Wood Products (2012) 70:225-232 doi: 10.1007/s00107-011-0539-x. Springer-Verlag, 2011.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. Sexta edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003. p. 52-65.

PINTO, E. M. **Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal a grã para o *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis***. 2005. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos/Insstituto de Física de São Carlos/Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2008.

SCHNEID, E; COELHO, C.; MORAES, P. D.; IORIS, M.; SCHMITZ, L. **Análise de ligações parafusadas em estruturas de madeira sob ação de temperaturas elevadas**. 2014. XIV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Natal – RN, 2014.

SILVA, M. M. E. **Efeito da termorreificação na resistência biológica da madeira de Bracatinga-comum (*Mimosa scabrella*)**. 2011. Monografica de Graduação – Curso de Engenharia Florestal. Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, Brasil, 2011.

SILVA, P. H. M. **Tratamentos prolongam uso da madeira**. 2006. Revista da Madeira, Curitiba, v. 17, n. 100, p. 78 – 80. Disponível em < [http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=984&subject=Pre servantes](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=984&subject=Pre%20servantes) >. Acesso em 11 out. 2017.

SZÜCS, C. A.; TEREZO, R. F.; VALLE, A.; MORAES, P. D. **Estruturas de madeira**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. p. 151-165. Disponível em < https://moodle.ufsc.br/pluginfile.php/1313798/mod_resource/content/0/Apostilamadeiras2015-1.pdf >. Acesso em 17 maio 2017.

APÊNDICE A

Nas Tabelas 10 a 15 constam os resultados individuais das rupturas dos corpos-de-prova.

Tabela 10 – Resultado do Grupo 1.

Grupo 1 - Estado natural		
CP	Força (kN)	Deslocamento máximo (mm)
1.1	38,45	7,398
1.2	34,7	4,634
1.3	40,95	7,504
1.4	40,4	8,228
1.5	31,85	5,065
1.6	40,7	3,561
Média	37,84	6,07
Desvio padrão	3,76	1,89

Tabela 11 – Resultado do Grupo 2.

Grupo 2 - Estado seco		
CP	Força (kN)	Deslocamento máximo (mm)
2.1	37,45	5,07
2.2	43,95	4,67
2.3	56,25	5,30
2.4	45,05	5,18
2.5	53,30	5,28
2.6	46,30	4,62
Média	47,05	5,02
Desvio padrão	6,78	0,30

Tabela 12 – Resultado do Grupo 3.

Grupo 3 - Aquecimento por meia hora		
CP	Força (kN)	Deslocamento máximo (mm)
3.1	50,85	6,24
3.2	53,30	4,21
3.3	52,70	5,82
3.4	42,40	4,23
3.5	48,60	3,00
3.6	45,85	3,63
Média	48,95	4,52
Desvio padrão	4,22	1,26

Tabela 13 – Resultado do Grupo 4.

Grupo 4 - Aquecimento por uma hora		
CP	Força (kN)	Deslocamento máximo (mm)
4.1	55,15	3,959
4.2	46,25	4,244
4.3	37,2	5,545
4.4	60,35	5,683
4.5	51,55	6,22
4.6	44,1	4,618
Média	49,10	5,04
Desvio padrão	8,29	0,90

Tabela 14 – Resultado do Grupo 5.

Grupo 5 - Aquecimento por uma hora e meia		
CP	Força (kN)	Deslocamento máximo (mm)
5.1	39,25	1,81
5.2	41,10	2,63
5.3	33,50	1,58
5.4	32,05	3,02
5.5	32,25	4,07
5.6	25,40	2,65
Média	33,93	2,62
Desvio padrão	5,64	0,89

Tabela 15 – Resultado do Grupo 6.

Grupo 6 - Aquecimento por três horas		
CP	Força (kN)	Deslocamento máximo (mm)
6.1	18,95	4,72
6.2	26,35	2,44
6.3	23,10	3,78
6.4	29,00	3,87
6.5	27,55	3,63
6.6	33,10	4,63
Média	26,34	3,85
Desvio padrão	4,89	0,83