

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANA LARA ZANUTO LEOPOLDINO

**ANÁLISE DO EFEITO DE GRUPO EM LIGAÇÕES COM
PARAFUSOS PASSANTES NA MADEIRA DA ESPÉCIE APULEIA
LEIOCARPA**

CAMPO MOURÃO

2021

ANA LARA ZANUTO LEOPOLDINO

**ANÁLISE DO EFEITO DE GRUPO EM LIGAÇÕES COM
PARAFUSOS PASSANTES NA MADEIRA DA ESPÉCIE APULEIA
LEIOCARPA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

CAMPO MOURÃO

2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

ANÁLISE DO EFEITO DE GRUPO EM LIGAÇÕES COM PARAFUSOS PASSANTES NA MADEIRA DA ESPÉCIE APULEIA LEIOCARPA

por

Ana Lara Zanuto Leopoldino

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 18h30min do dia 04 de maio de 2021, como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira
((UTFPR))

Prof. Dr. Leandro Waidemam
(UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes
(UTFPR)
Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dra. Paula Cristina de Souza

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

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todo apoio nesses anos de graduação, pelo trabalho duro que eles desempenham para criar eu e minhas irmãs da melhor maneira possível e por todas as oportunidades que tive graças a isso.

Às minhas irmãs que sempre me ajudaram a passar pelos momentos difíceis. Ao meu namorado, Guilherme, que mesmo de longe sempre me apoiou com palavras de incentivo, ouvia meus desabafos diários perante as dificuldades e ainda assim me dava motivação para continuar a me esforçar.

Aos amigos que fiz durante a graduação, Vitória, Marco, Diogo, Tawane e Jocileila, que foram minha família em Campo Mourão e me traziam alegrias necessária para superar a saudade de casa e ter dias mais leves na universidade. A eles desejo todo sucesso do mundo nessa nova etapa de nossas vidas.

Ao meu orientador, que bem mais que um professor se tornou um amigo, graças a minha participação no grupo PET, onde pude conhecê-lo e admirá-lo como pessoa e profissional.

Ao grupo PET por todas as experiências, oportunidades e desafios que pude viver.

À Universidade por me oferecer meios de desenvolver a minha pesquisa, pela disponibilidade do técnico do laboratório de estruturas, Maiko, que nos ajudou nos ensaios experimentais.

Por fim, agradeço a Deus por ter me dado todo o suporte emocional nesses anos de graduação, sem Ele nada em minha vida seria possível, tudo que tenho e sou é graças às Suas bênçãos.

RESUMO

As edificações em madeira são projetadas e construídas com a união de diversos elementos estruturais como vigas, pilares, etc. Os elementos estruturais assim como as ligações que os unem devem ser projetados de forma a atender certos requisitos, como, por exemplo, a economia e segurança. As ligações em madeira, em particular as formadas por pinos metálicos, apresentam um fenômeno característico chamado de efeito de grupo, que consiste na redução da eficiência estrutural em função do número de pinos em linha. Esse fenômeno vem sendo estudado há anos e já se encontra previsto em documentos normativos, entretanto, com diferenças significativas. Considerando que a norma brasileira de projeto de estruturas de madeira se encontra atualmente em revisão, surge a oportunidade de verificar experimentalmente o efeito de grupo e comparar os resultados com as recomendações dos documentos normativos. Neste trabalho foram avaliadas ligações com parafusos passantes sextavados, M10-ISO 8.8, em madeira da espécie *Apuleia leiocarpa* (garapeira), com espaçamento de "5d", variando o número de parafusos em linha. Os resultados indicaram que o documento normativo europeu está a favor da segurança e os documentos normativos brasileiro e norte americano são contrários à segurança.

Palavras-Chave: Conectores. Resistência. Efeito de Grupo. Estruturas.

ABSTRACT

Wooden buildings are designed and built with the union of several structural elements such as beams, collun, etc. The structural elements as well as the connections that unite them must be designed in order to meet certain requirements such as economy and safety. The wooden connections, in particular those formed by metallic pins, present a characteristic phenomenon called group effect, which consists in the reduction of structural efficiency depending on the number of pins in line. This phenomenon has been studied for years and is already foreseen in normative documents, however, with significant differences. Considering that the brazilian norm for the design of wooden structures is currently under review, the opportunity arises to experimentally verify the group effect and compare the results with the recommendations of the normative documents. In this work, connections with M10-ISO8.8 hexagonal bolts were evaluated, in wood of the *Apuleia leiocarpa* species (garapeira), with 5d spacing, varying the number of screws in line. The results indicated that the european normative document is in favor to safety and the brazilian and north american normative documents are opposed to safety.

Keywords: Connectors. Strenght. Group effect. Structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Força por parafuso com aumento gradual do carregamento.....	15
Figura 2 - Ligações com parafusos de 3/4" e 1/2".....	17
Figura 3 - Carga de ruptura e modos de falha em ligações parafusadas com chapas metálicas laterais	18
Figura 4 - Modelo Europeu dos modos de falha em ligações de duplo corte.....	19
Figura 5 - Efeito do espaçamento "a1"	19
Figura 6 - Corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras.....	24
Figura 7 - Diagrama de carregamento do ensaio de compressão paralela às fibras.....	25
Figura 8 - Corpo de prova de ensaio de umidade e densidade.....	26
Figura 9 - Corpo de prova para ensaio das ligações com 2 e 3 parafusos.....	27
Figura 10 - Corpo de prova para ensaio das ligações de 1 a 8 parafusos.....	28
Figura 11 - Procedimento do ensaio de ligação.....	28
Figura 12 - Diagrama idealizado força-deslocamento.....	29
Figura 13 - Ruptura característica dos corpos de prova de ligação.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados ensaios de caracterização.....	30
Tabela 2 – Resultados ensaios de ligação.....	31
Tabela 3 – Resultados Efeito de Grupo.....	31

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Análise dos resultados do Efeito de Grupo.....	32
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

a1	Espaçamento entre parafusos na direção paralela ao carregamento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AWC	American Wood Council
Cd	Fator de duração do carregamento
CEN	Comitê Europeu de Normatização
Cg	Fator de grupo
Cm	Fator de umidade
Ct	Fator de temperatura
d	Diâmetro do pino
EN	Norma Europeia
EYT	European Yield Theory
MPa	Megapascal
N	Newton
NBR	Norma brasileira
NDS	National Design Specification
PN	Proposta de norma
4d	Espaçamento entre parafusos igual a quatro vezes o seu diâmetro
5d	Espaçamento entre parafusos igual a cinco vezes o seu diâmetro
$F_{v,Rk}$	Resistência característica de um pino, correspondente a uma dada seção de corte
n	Número de pinos metálicos
n_{ef}	Número efetivo de pinos por ligação
n_{sp}	Número de seções de corte por pino metálico
R_k	Resistência característica de ligações de elementos de madeira com pinos metálicos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivo Geral.....	11
2.2 Objetivos Específicos.....	11
3 JUSTIFICATIVA.....	12
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.	14
4.1 Efeito de Grupo em Ligações com Pinos Metálicos.....	14
4.2 Fatores que Influenciam o Efeito de Grupo.....	16
4.3 Documentos Normativos.....	20
4.3.1 ABNT NBR 7190:1997.....	20
4.3.2 CEN EUROCODE 5:2008.....	21
4.3.3 AWC NDS:2018 (National Desing Specification for Wood Construction)....	22
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
5.1 Ensaio de Compressão Paralela às Fibras.....	24
5.3 Ensaio de Densidade e Teor de Umidade.....	25
5.3 Ensaio de Ligações.....	26
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
6.1 Resultados dos Ensaio de Caracterização dos Materiais.....	30
6.2 Análise do Efeito de Grupo.....	31
7 CONCLUSÕES.....	34
8 REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é uma grande consumidora de recursos naturais não renováveis. A construção, por métodos tradicionais com concreto armado, exige a extração de minérios, detonações rochosas para obter agregados, entre outros processos que, além de onerosos, são agressivos ao meio ambiente.

A busca por soluções ambientalmente corretas e mais econômicas é um desafio. O uso da madeira pode ser uma alternativa, pois é um material renovável e quando comparado aos citados que são utilizados nas construções tradicionais, não se esgota facilmente devido à rápida velocidade de renovação pela natureza.

Naturalmente a madeira tem limitação em suas dimensões. Para obter peças que atendam o especificado em projeto, que vençam grandes vãos e alcancem maiores alturas é necessário o uso de ligações entre peças de madeira. No Brasil o método de ligações mais utilizado é por pinos metálicos. Para atender os requisitos de projetos e transferir efetivamente os esforços entre peças ligadas, algumas conexões necessitam de mais de um pino metálico.

Este trabalho apresenta diversos estudos, os quais concluem que em ligações com múltiplos pinos a distribuição dos esforços entre eles não é uniforme e a resistência da ligação não pode ser considerada como a simples multiplicação da capacidade de carga de um único pino pelo número total de conectores, sendo este fenômeno conhecido com efeito de grupo.

O efeito de grupo é considerado pelos documentos normativos para projetos em madeira através de redutores do número real de pinos para um número efetivo, como é o caso do documento brasileiro (ABNT NBR 7190:1997) e europeu (CEN EUROCODE 5:2008). Nos Estados Unidos (AWC NDS:2018) é introduzido um coeficiente redutor da resistência da ligação como é utilizado para outros fatores, como a umidade da peça, por exemplo.

Considerando que a norma brasileira, ABNT NBR 7190:1997, atualmente está em revisão e que estão sendo propostos diferentes espaçamentos mínimos entre os conectores, surge a necessidade de avaliar experimentalmente o efeito de grupo em ligações parafusadas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o efeito de grupo nas ligações em madeira, da espécie *Apuleia leiocarpa*, com parafusos passantes através da comparação de resultados obtidos em ensaios de resistência com o proposto nos documentos normativos Brasileiro (ABNT NBR 7190:1997), Europeu (CEN EUROCODE 5:2008) e Norte Americano (AWC NDS:2018).

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar os parâmetros que influenciam o efeito de grupo;
- Realizar ensaios laboratoriais para determinar a resistência das ligações com variação do número de parafusos;
- Comparar os resultados obtidos experimentalmente com os preconizados nas normas nacionais e internacionais;
- Propor uma equação que represente o efeito de grupo com base nos resultados obtidos experimentalmente.

3 JUSTIFICATIVA

A madeira é um material abundante e renovável e uma solução para os problemas encontrados na construção civil como a grande geração de resíduos e uso de materiais não renováveis. Sendo um material natural, a madeira tem algumas características físicas e químicas que devem ser consideradas para determinação de suas propriedades, tornando a madeira alvo de diversos estudos.

Para ser utilizada em estruturas de grandes dimensões é necessária a ligação de várias peças maciças, uma vez que naturalmente a madeira tem limitação de tamanho, uma das formas de realizar essa ligação é através de pinos metálicos, objeto de estudo desse trabalho, usualmente conhecidos como pregos e parafusos.

De acordo com Moss (1997), a distribuição da carga em um elemento é afetada pela rigidez relativa dos membros de madeira com os elementos de ligação, portanto a resistência da estrutura é influenciada pela resistência da ligação. Essa distribuição de carga é desigual quando se utiliza diversos conectores em linha, a resistência de cada pino é menor que a multiplicação da resistência de um conector em uma ligação simples, pelo número de elementos de ligação.

Esse fenômeno é chamado efeito de grupo e é considerado nas normas de dimensionamento de estruturas em madeira por meio de um fator de modificação do número efetivo de parafusos. Pela ABNT NBR 7190:1997, em ligações com até oito pinos, a resistência da ligação é a multiplicação da resistência de um parafuso pelo número de conectores da ligação em questão, para mais de oito pinos é considerada $2/3$ da resistência para cada pino adicional.

O documento normativo europeu, CEN EUROCODE 5:2008 estabelece equações em função do diâmetro dos parafusos. A norma norte americana, AWC NDS:2018 (National Design Specification for Wood Construction 2018) considera o efeito de grupo por meio de um fator de redução da capacidade da ligação.

A diferença entre os modelos propostos pelos documentos normativos motiva esse trabalho a buscar resultados experimentais que possam comparar os parâmetros de segurança apresentados por eles.

Recentemente foi realizada pesquisa sobre o tema no Brasil e os autores concluíram que o modelo proposto pela norma Brasileira não era adequado, tampouco o modelo da norma Europeia (GONÇALES; ODA, 2018).

Atualmente a norma ABNT NBR 7190:1997 está em processo de revisão e uma das propostas é a alteração do espaçamento entre os conectores, o que pode influenciar diretamente no comportamento das ligações, especificamente no efeito de grupo. Surge assim a necessidade da avaliação experimental do efeito de grupo para ligações parafusadas, considerando o novo espaçamento de norma.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Efeito de Grupo em Ligações com Pinos Metálicos

Para determinar a resistência das estruturas em madeira, deve ser levada em consideração a resistência do material e das ligações. A distribuição da carga aplicada em um elemento é afetada pela rigidez relativa dos membros de madeira com os elementos de ligação, portanto a resistência da estrutura é influenciada pela resistência da ligação. Essa distribuição de carga é desigual quando são utilizados diversos conectores em linha. A resistência destes pinos é menor que a simples multiplicação da capacidade de um único conector pelo número de elementos de ligação (MOSS, 1997).

Segundo Hossain et al (2019), até a década de 1960, o efeito de grupo não era explicitamente considerado no dimensionamento de estruturas de madeira e a resistência de uma conexão era simplesmente assumida como a resistência de um único fixador multiplicado pelo número de conectores da ligação. Baseados em estudos, a partir da década de 1970 os documentos normativos passaram a utilizar fatores para considerar o efeito de grupo nas ligações com pinos metálicos.

Doyle (1964), testou ligações com um único parafuso e com oito parafusos divididos em duas linhas, cada uma com quatro, variou em seus ensaios o diâmetros dos pinos e espaçamento entre eles, concluiu que a força suportada pelas ligações com múltiplos parafusos de $\frac{3}{4}$ " de diâmetro foi entre 61% e 78% da força suportada na ligação com um único pino, e entre 79% e 93% para pinos com diâmetro de $\frac{1}{2}$ ". Afirmou então que a força suportada por cada parafuso na ligação múltipla não era proporcional a força que um único parafuso suportava nos corpos de prova de ligação simples.

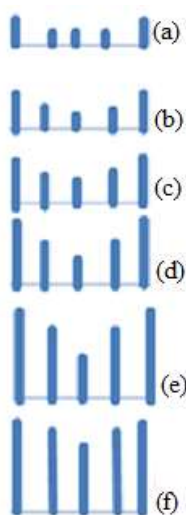
A menor resistência nas ligações com oito parafusos indica que fatores como fissuração, fendilhamento, tensão paralela e perpendicular as fibras e possivelmente deslizamento não uniforme de todos os parafusos influenciaram a falha antes que a resistência final da madeira fosse atingida (DOYLE, 1964).

Cramer (1967), realizou um estudo experimental e teórico para ligações parafusadas em linha e observou que a distribuição de esforços entre os parafusos não foi uniforme. Os pinos externos são mais solicitados que os internos e, conforme

o número de parafusos aumenta, menos força é transferida aos internos e a solicitação dos extremos é maior.

De acordo com esta última premissa, a pesquisa de Beedle et al, (1964) constatou que, em uma linha de parafusos, os próximos às extremidades podem atingir seus limites elásticos, enquanto pinos centrais da linha têm solicitação distante do limite, como mostra a **Figura 1**.

Figura 1 - Força por parafuso com incremento gradual. (a) os parafusos das extremidades são solicitados logo no início do carregamento; (b) os parafusos seguintes começam a ser solicitados após os extremos; (c) início da solicitação do parafuso central; (d) início da plastificação dos parafusos das extremidades; (e) início da plastificação dos parafusos seguintes; (f) plastificação do parafuso central.



Fonte: Beedle et al (1964)

Lantos (1969), sugeriu que a resistência de uma ligação de madeira com múltiplos conectores não deve ser uma função linear entre o número de conectores e a força suportada por um único conector. Lantos utiliza um fator de rigidez que analisa o deslizamento entre as peças ligadas. Em sua análise, Lantos estudou parafusos em uma única linha e assumiu que a força máxima suportada pelo parafuso ocorre nas extremidades das ligações.

Os fatores que influenciam a distribuição de forças nos parafusos são: a rigidez das peças ligadas (elementos de madeira laterais e central), o número de parafusos e seu espaçamento e a rigidez dos conectores. À medida que a rigidez da ligação e a quantidade de parafusos aumenta, menos uniforme é a distribuição de carga entre os conectores (LANTOS,1969).

Cramer e Lantos desenvolveram métodos analíticos a partir de seus estudos que determinariam a distribuição de carga entre os parafusos pertencentes a uma linha de pinos dispostos paralelamente às fibras da madeira. Os modelos propostos pelos autores deram base para o documento normativo norte-americano (NDS, 2018) para construções em madeira (QUENNEVILLE, 2010).

Wilkinson (1980), após revisar os métodos analíticos propostos por Cramer (1967) e Lantos (1969), sugere um método analítico para a distribuição de carga em uma ligação multiparafusada considerando o escoamento não uniforme entre os pinos e os defeitos de fabricação das ligações.

Wilkinson (1986), investigou as conclusões do método que havia sugerido em 1980, após avaliá-lo na prática. Os resultados evidenciaram que cada linha de parafusos possui uma distribuição de carga única, que depende da variação na curva de força-deslocamento e do modo de fabricação das peças, por exemplo, a perfuração mal executada resulta na transmissão de carga menor para esse parafuso. Concluiu então que o uso de uma curva de distribuição única para todos os casos de ligações com parafusos em linha não é a favor da segurança, uma vez que os fatores citados (distribuição não uniforme das cargas e efeitos da fabricação) não são considerados.

Apesar da afirmação de Wilkinson (1986), os projetos em madeira têm como base os métodos propostos por Cramer (1967) e Lantos (1969) e o desempenho das estruturas é satisfatório devido à adoção de coeficientes que subestimam a resistência das estruturas, portanto estas não são submetidas a esforços próximos de seus limites.

4.2 Fatores que Influenciam o Efeito de Grupo

O efeito de grupo é afetado por alguns fatores que variam conforme o tipo de ligação e especificações de projeto da execução desta. O diâmetro e esbeltez dos conectores, o número de pinos e espaçamento entre eles, são alguns fatores que causam influência no efeito de grupo. A seguir são apresentados estudos sobre cada um destes fatores.

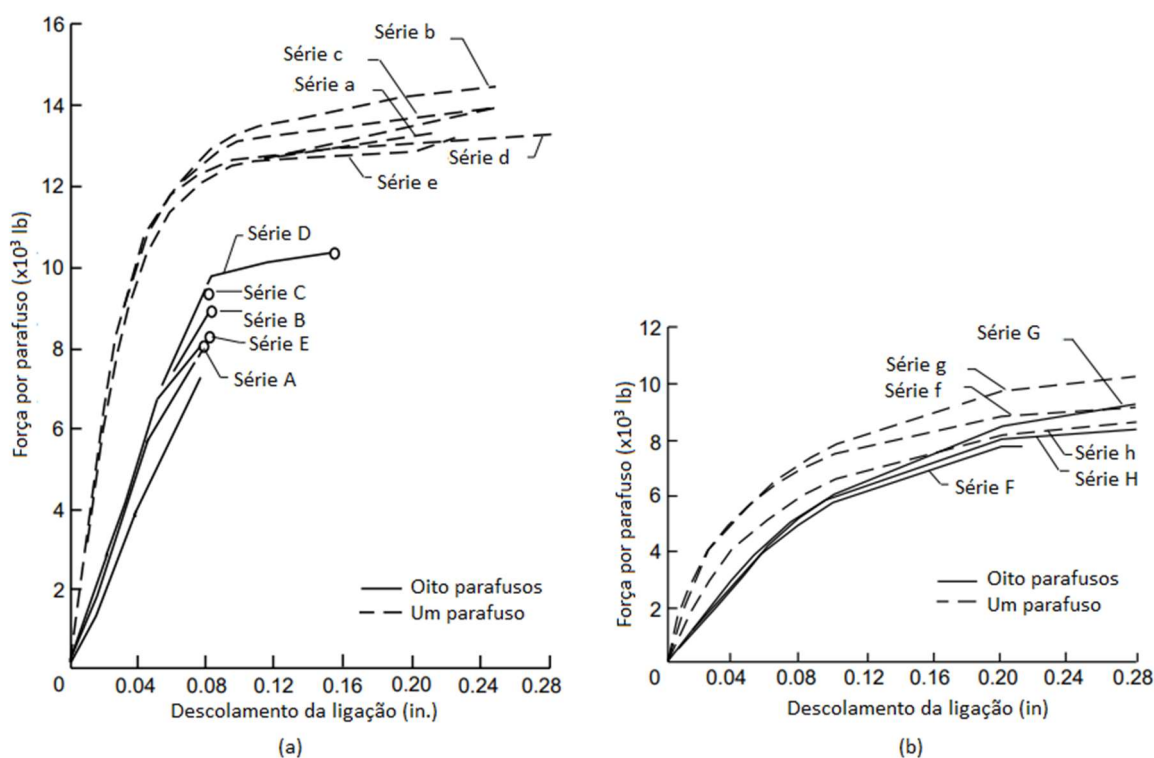
Os testes realizados por Doyle (1964), comparando o desempenho de ligações simples e multiparafusadas constatou a influência do diâmetro do pino. A

Figura 2,a, mostra a curva “Força x Deslocamento” das ligações analisadas. As séries de “A-E” representam as ligações com 8 conectores de $\frac{3}{4}$ ” (19 mm) enquanto as séries de “a-e” representam as ligações com único parafuso do mesmo diâmetro. A Figura 2,b, mostra os resultados do mesmo teste da anterior variando apenas o diâmetro do pino para $\frac{1}{2}$ ” (12,5 mm), as séries de “F-H” representam as conexões com 8 parafusos e de “f-h” com um único pino.

Comparando as duas figuras, é possível perceber que para os parafusos de maior diâmetro (Figura 2,a) a diferença da capacidade de cada parafuso nas ligações multiparafusadas com as ligações simples é maior que nos parafusos de menor diâmetro (2,b) pela maior proximidade entre as curvas nas séries desta segunda figura.

Os outros fatores estudados por Doyle (1964), que representam cada série das figuras, como espaçamento, reforço de parafusos perpendiculares e extremidade biselada, não apresentaram influência significativa, como é possível perceber pela proximidade das curvas das séries para cada diâmetro e número de parafusos.

Figura 2 - Ligações com parafusos de (a) $\frac{3}{4}$ ” e (b) $\frac{1}{2}$ ”



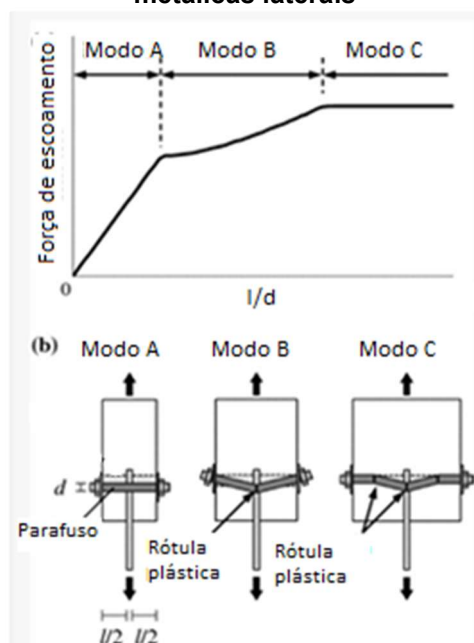
Fonte: Doyle (1964)

A razão entre o comprimento do parafuso e seu diâmetro (L/d) é conhecida como esbeltez e tem influência no modo de ruptura das ligações. Sawata (2015), revisa os estudos sobre a esbeltez e apresenta um resumo e um esquema que explica a influência deste parâmetro para a resistência das ligações de madeira com uma placa metálica central.

Ligações formadas por parafusos com esbeltez maior tendem a conferir maior resistência a conexão. A relação entre força e esbeltez é devido a deformação das ligações e os modos de falha que ocorrem com a variação da esbeltez. A Figura 3 mostra a curva de escoamento para cada modelo de ligação com esbeltez variável. Quando a relação L/d é pequena (Modo A) a força de escoamento aumenta conforme a esbeltez aumenta, isso porque a ruptura se dá de forma frágil, sem plastificação do parafuso (SAWATA, 2015).

No modo B, com a esbeltez maior, o momento de escoamento é atingido ao longo do parafuso e é formada uma rótula plástica que leva a ligação à ruína, agora de forma dúctil, como o rompimento do parafuso, atingindo uma maior carga. Quando a relação L/d aumenta ainda mais (Modo C), outras rótulas plásticas são formadas ao longo do pino após o escoamento e a partir de uma determinada esbeltez a força de escoamento não apresenta mais aumento (SAWATA, 2015).

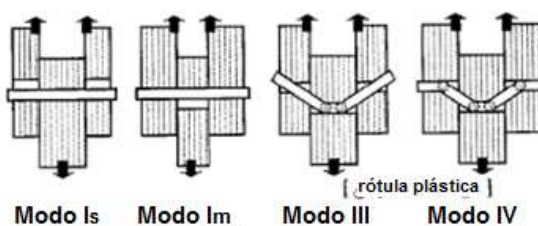
Figura 3 - Carga de ruptura e modos de falha em ligações parafusadas com chapas metálicas laterais



Fonte: Sawata (2015)

Para ligações entre elementos de madeira sem a presença de chapas metálicas, pela análise do *European Yield Theory* (EYT), proposto com base nas teorias de Johansen (1949), o modo de falha que permite a maior resistência das ligações é o “Modo IV” da Figura 4, no qual os membros laterais têm a mesma espessura do membro principal e o pino metálico maior esbeltez (SMITH; FOLIENSTE, 2002).

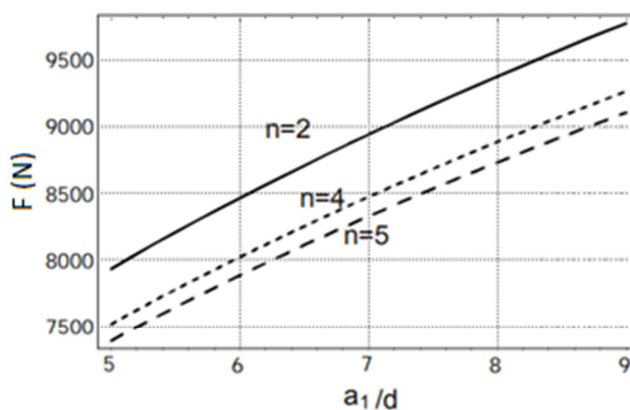
Figura 4 - Modelo Europeu dos modos de falha em ligações de duplo corte



Fonte: Smith; Foliente (2002)

Schmid et al (2002), estudou os modelos analíticos propostos por Johansen (1949) e Jorissen (1998), comparou o efeito da distância, espaçamento, diâmetro e número de parafusos em linha. Concluiu que em ligações com múltiplos conectores, o espaçamento entre eles na direção paralela ao carregamento tem grande influência na capacidade da ligação, uma vez que a proximidade entre pinos gera acúmulo de tensões na região entre eles possibilitando a ruptura da madeira. A Figura 5 mostra o efeito do espaçamento entre parafusos com base na teoria de Johansen (1949), com o aumento do espaçamento, a capacidade de cada parafuso aumenta gradualmente.

Figura 5 - Efeito do espaçamento “a1”



Fonte: Schmid et al (2002)

O número de parafusos é o fator mais evidente que influencia o efeito de grupo, uma vez que este é gerado pela distribuição não uniforme dos esforços em ligações com múltiplos parafusos. Portanto a necessidade de considerar uma redução no número de parafusos, através do número efetivo foi estudada e implementada nos principais documentos normativos.

Para Zahn (1991), sem essa redução a resistência das ligações é superestimada, levando em conta que cada parafuso não recebe o mesmo esforço em uma linha de conectores paralela ao carregamento.

4.3 Documentos Normativos

4.3.1 ABNT NBR 7190:1997

A norma brasileira considera o efeito de grupo através do número efetivo de pinos por ligação. Segundo a norma, nas ligações com até oito pinos dispostos em linha paralela às fibras da madeira, a resistência total é dada pela soma das resistências de cada pino. Em ligações com mais de oito pinos em linha, o número de pinos deve ser substituído pelo número efetivo, dado pela Equação (1).

$$n_{ef} = 8 + \frac{2}{3} (n - 8) \quad (1)$$

Onde:

n_{ef} = Número efetivo de pinos por ligação;

n = Número de pinos metálicos.

Segundo a proposta de revisão da norma brasileira (PN ABNT NBR 7190:2013) a resistência característica de ligações de elementos de madeira com pinos metálicos, pregos e parafusos, pode ser estimada segundo a Equação (2):

$$R_k = F_{v,Rk} \cdot n_{sp} \cdot n_{ef} \quad (2)$$

Onde:

R_k = Resistência característica de ligações de elementos de madeira com pinos metálicos;

n_{sp} = Número de seções de corte por pino metálico;

$F_{v,Rk}$ = Resistência característica de um pino, correspondente a uma dada seção de corte;

n_{ef} = Número efetivo de pinos por ligação (calculado pela Equação (1)).

4.3.2 CEN EUROCODE 5:2008

O código europeu embasado nas pesquisas de Jorissen (1998) afirma que a resistência de uma conexão com múltiplos conectores do mesmo tipo e dimensão, pode ser menor que a simples soma das resistências individuais de cada conector.

Para abordar essa redução da resistência a norma considera o número efetivo de elementos de ligação.

Para uma linha de conectores paralela à direção das fibras, a resistência característica efetiva na linha $F_{v,ef,k,Rk}$, é dada pela Equação 3:

$$F_{v,ef,k,Rk} = n_{ef} \cdot F_{v,Rk} \quad (3)$$

Onde:

$F_{v,ef,k,Rk}$ = Capacidade de carga característica efetiva na linha;

n_{ef} = Número efetivo de pinos por ligação;

$F_{v,Rk}$ = Resistência característica de um pino, correspondente a uma dada seção de corte;

Para parafusos, o CEN EUROCODE 5:2008 determina a Equação 4 para obter o n_{ef} de conectores em uma ligação:

$$n_{ef} = \min \left\{ n, \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \right\} \quad (4)$$

Onde:

n = Número de parafusos em uma linha;

d = Diâmetro do parafuso;

a_1 = Espaçamento entre parafusos na direção das fibras.

Para carregamentos perpendiculares às fibras, o número efetivo de conectores segue a Equação 5.

$$n_{ef} = n \quad (5)$$

Para ângulos de 0° a 90° entre a direção das fibras e o carregamento, n_{ef} é determinado pela interpolação entre às Equações 4 e 5.

4.3.3 AWC NDS:2018 (National Desing Specification for Wood Construction)

O documento normativo norte americano apresenta uma maneira diferente para considerar o efeito de grupo nas ligações, ao invés de utilizar um número efetivo usa um fator redutor da resistência.

O Fator de Grupo (C_g) dado pela AWC NDS:2018 junto com outros fatores de modificação, como por exemplo, Fator de Duração do Carregamento (C_d), Fator de umidade (C_m) para condições de umidade acima da usual, Fator de Temperatura (C_t) para situações de elevadas temperaturas, são considerados na determinação da resistência das peças conectadas. O Fator de Grupo (C_g) é obtido pela Equação 6.

$$C_g = \left[\frac{m(1-m^{2n})}{n[(1+R_{EA}m^n)(1+m)-1+m^{2n}]} \right] \left[\frac{1+R_{EA}}{1-m} \right] \quad (6)$$

Onde:

$C_g = 1$ para fixadores passantes com $D < 1/4''$;

n = Número de fixadores em uma linha;

R_{EA} = O menor entre $\frac{E_s A_s}{E_m A_m}$ e $\frac{E_m A_m}{E_s A_s}$;

E_m = Módulo de elasticidade do membro principal;

E_s = Módulo de elasticidade dos membros laterais;

A_m = Área da seção bruta do membro principal;

A_s = Soma das áreas da seção bruta dos membros laterais;

$$m = u - \sqrt{u^2 - 1}$$

$$u = 1 + \gamma \frac{s}{2} \left[\frac{1}{E_m A_m} + \frac{1}{E_s A_s} \right]$$

s= Espaçamento de eixo a eixo de fixadores em linha;

γ = Carregamento/módulo de deslizamento de um conector, sendo:

=500,000 lbs/in para 4" anéis ou placas de cisalhamento;

=400,000 lbs/in para 2-1/2" anéis ou 2-5/8" placas de cisalhamento;

=(180,000)($D^{1.5}$) para fixadores do tipo passante em ligações de placas de madeira;

=(270,000)($D^{1.5}$) para fixadores do tipo passante em ligações de placas de madeira com placas de metal;

D= Diâmetro do fixador do tipo passante.

Quando há linhas de conectores paralelas onde estes estiverem posicionados de maneira escalonada, caso a distância entre as linhas adjacentes for menor que $\frac{1}{4}$ da distância (medida paralelamente às fibras) entre os conectores mais próximos, deve-se considerar como se fossem uma única linha para o cálculo de Cg. Para números pares de linhas essa consideração é feita a cada par e em caso de números ímpares uma das linhas será considerada da maneira comum.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

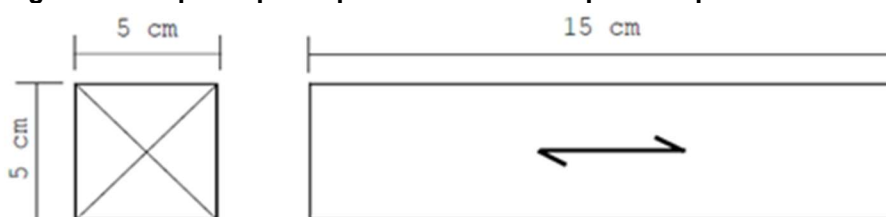
Os ensaios foram realizados nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Campo Mourão no Laboratório de Sistemas Estruturais, utilizando um lote de madeira da espécie Garapeira (*Apuleia leiocarpa*).

Foram confeccionados corpos de prova para realização dos ensaios de caracterização da madeira, sendo estes: compressão paralela às fibras, densidade e teor de umidade. Para análise da resistência das ligações foram realizados ensaios com corpos de prova com pinos em corte duplo. Os procedimentos de ensaios de ligações seguiram a norma europeia, CEN EN 26891:1991, as dimensões dos corpos de prova e os procedimentos de ensaios de caracterização da madeira, foram realizados de acordo com a ABNT NBR 7190:1997.

5.1 Ensaio de Compressão Paralela às Fibras

Para os ensaios de compressão paralela às fibras foram confeccionados sete (7) corpos de prova de 5cm x 5cm x 15cm (Figura 6), de acordo com a ABNT NBR 7190:1997 –Anexo B.

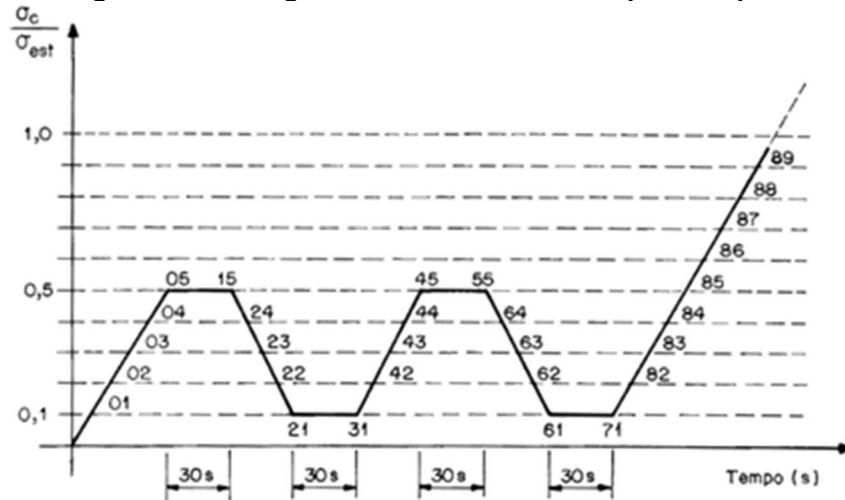
Figura 6 - Corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997) – Anexo B

Os procedimentos de ensaio foram realizados conforme descrito no anexo B da ABNT NBR 7190:1997, foram aplicados dois ciclos de carga e descarga como especificado no diagrama de carregamento da Figura 7.

Figura 7 - Diagrama de carregamento do ensaio de compressão paralela às fibras



Fonte: ABNT NBR 7190:1997 – Anexo B.

A resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) é obtida pela Equação (7):

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,M\acute{a}x.}}{A} \quad (7)$$

Onde:

f_{c0} : resistência à compressão paralela às fibras, em mega pascal;

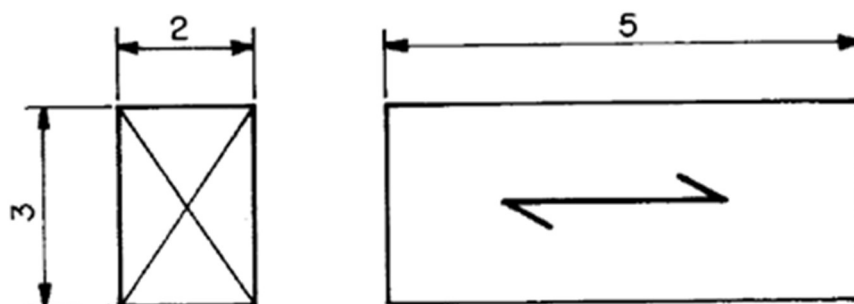
$F_{c0,M\acute{a}x.}$: máxima força de compressão aplicada ao corpo de prova, em newton;

A : área da seção transversal comprimida, em metro quadrado.

5.3 Ensaio de Densidade e Teor de Umidade

Para determinação da densidade e teor de umidade da madeira foram confeccionados dezoito (18) corpos de prova com dimensões segundo a norma ABNT NBR 7190:1997, como ilustra a Figura 8.

Figura 8 - Corpo de prova de ensaio de umidade e densidade



Fonte: ABNT NBR 7190:1997 – Anexo B.

Para determinação do teor de umidade ($U(\%)$) foram realizadas as medições da massa inicial (m_i) dos corpos de prova e a massa seca (m_s), medida após procedimento de secagem da madeira descrito na NBR 7190:1997 e esses dados foram relacionados pela Equação 8:

$$U(\%) = \frac{(m_i - m_s)}{m_s} \cdot 100 \quad (8)$$

Para determinar a densidade da madeira (ρ), foi aplicada a Equação 9, que utiliza valores de massa inicial (m_i) e volume inicial (V_i) dos mesmos corpos de prova do ensaio de umidade.

$$\rho = \frac{m_i}{V_i} \quad (9)$$

5.3 Ensaios de Ligações

Foram confeccionados corpos de prova de ligação segundo as especificações dadas pela ABNT NBR 9170:1997, para pinos em corte duplo, com a peça central com 50 mm de espessura e peças laterais (cobrejuntas) tendo 25 mm de espessura. Os parafusos utilizados do tipo passante, sextavados de rosca

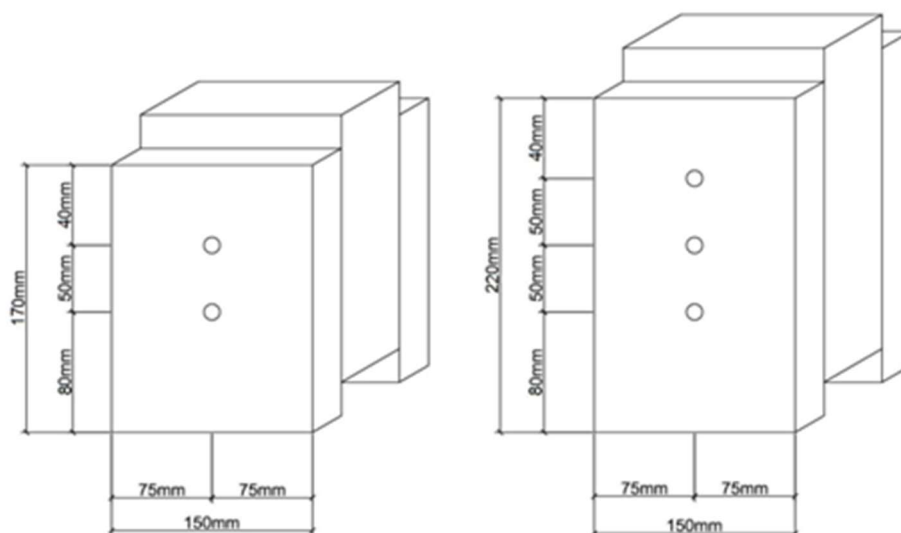
parcial com diâmetro de 10 mm (M10) produzidos em aço estrutural ISO 4016 (898-1) Classe 8.8.

O espaçamento entre os parafusos na direção paralela as fibras é de “5d” (cinco vezes o diâmetro do pino metálico), a distância do centro do pino à extremidade carregada da peça é “8d” e a distância do centro do pino à extremidade não carregada é “4d”, todos esses espaçamentos estão de acordo com a proposta de revisão da norma brasileira, PN ABNT 7190:2013.

Segundo a versão vigente da norma brasileira, ABNT NBR 7190:1997, o espaçamento entre parafusos na direção paralela às fibras seria “4d”, com o intuito de obter um melhor desempenho das ligações usou-se o valor da proposta de revisão, “5d”.

Foram confeccionados seis corpos de prova para cada número de parafusos, variando de um a oito parafusos, portanto no total são 48 corpos de prova. A Figura representa os corpos de prova com dois e três parafusos com os espaçamentos e distâncias citados e a Figura 10 mostra os corpos de prova de 1 a 8 parafusos.

Figura 9 - Corpos de prova para ensaio das ligações com 2 e 3 parafusos



Fonte: Autoria própria (2019)

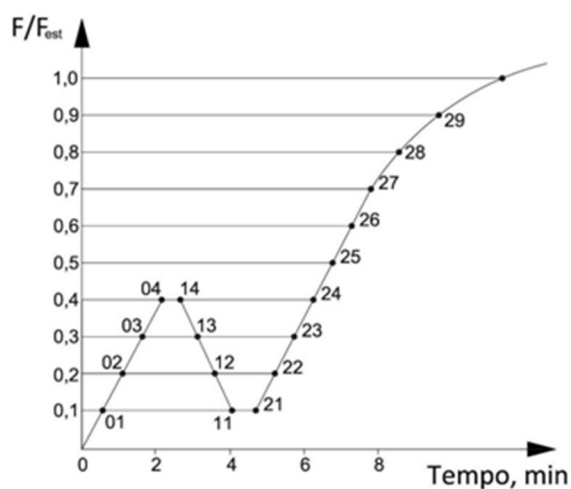
Figura 10 - Corpos de prova para ensaios de ligações de 1 a 8 parafusos



Fonte: Autoria própria (2020)

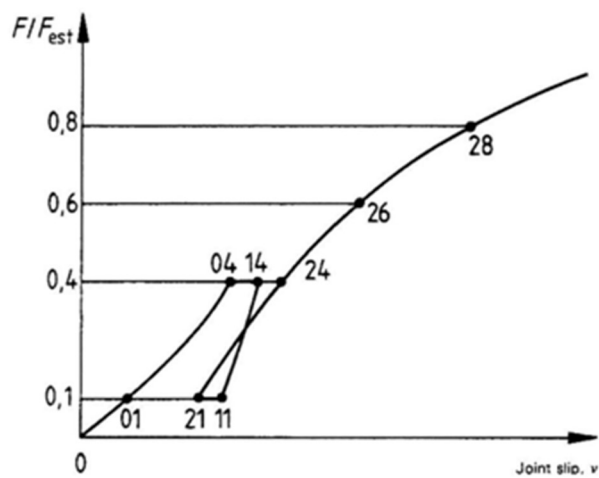
O ensaio para obter a resistência das ligações foi de acordo com a norma CEN EN 26891:1991, e esse valor é determinado pela força resistida pelo corpo de prova quando o deslocamento atingir 15 mm ou a força última do ensaio, caso ocorra com menos de 15mm de deslocamento. A Figura 11 ilustra o ciclo de carregamento do ensaio de resistência das ligações. Os valores obtidos após os ciclos de carregamentos permitem a obtenção de curva semelhante à Figura . O corpo de prova no momento do rompimento é ilustrado na Figura 13.

Figura 11 - Procedimento do ensaio de ligação



Fonte: Adaptado de CEN EN 26891:1991

Figura 12 – Diagrama idealizado força-deslocamento



Fonte: Adaptado CEN EN 26891:1991.

Figura 13 - Ruptura característica dos corpos de prova de ligação.



Fonte: Autoria própria (2020).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da madeira e da resistência das ligações para análise do efeito de grupo são apresentados a seguir.

6.1 Resultados dos Ensaio de Caracterização dos Materiais

Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados conforme descrito na metodologia desse trabalho. Os ensaios para obter a umidade e densidade utilizaram os mesmos dezoito corpos de prova. A média dos valores de umidade e densidade e o coeficiente de variação dos resultados estão descritos na Tabela 1. O ensaio de compressão paralela às fibras foi realizado com sete corpos de prova, a média da resistência à compressão dos corpos de prova e o coeficiente de variação dos valores obtidos nos corpos de prova estão também apresentados na Tabela 1.

Para os cálculos do efeito de grupo para a norma norte americana (AWC NDS 2018) adotou-se o módulo de elasticidade (E_{c0}) da madeira apresentado no Anexo E da norma brasileira (ABNT NBR 9170:1997), igual a 18,359 MPa.

Tabela 1 - Resultados dos Ensaio de Caracterização

PROPRIEDADE	MÉDIA	COEF VARIAÇÃO (%)	NÚMERO DE CPs
UMIDADE	11,75 %	13,9	18
DENSIDADE	863,9 kg/m ³	5,0	18
COMPRESSÃO	68,0 MPa	10,7	7

Fonte: Autoria Própria (2020)

Os resultados obtidos são satisfatórios, uma vez que são próximos do esperado, o teor de umidade da madeira está bastante próximo da umidade de equilíbrio da madeira, de 12%, segundo a ABNT NBR 7190:1997. A densidade, segundo a mesma norma, deveria ser 892 kg/m³ para o teor de 12%, portanto, 863,9 kg/m³ para a umidade de 11,75% é um valor coerente.

A resistência à compressão paralela às fibras para a espécie de madeira *Apuleia leiocarpa*, segundo a norma brasileira é de 78,9 MPa, sendo o resultado obtido neste trabalho, aproximadamente, 14% menor que este valor, um valor razoável considerando as não uniformidades da madeira.

6.2 Análise do Efeito de Grupo

Os resultados obtidos nos ensaios de ligações parafusadas dos corpos de prova de um a oito parafusos foram tabelados e para obter o valor do efeito de grupo foi calculada a resistência média por parafuso, dividindo o valor obtido nos ensaios pelo número de parafusos dos corpos de prova.

O efeito de grupo representa uma redução na resistência por conector quando tem-se uma ligação com mais de um parafuso, portanto, seu valor é dado com a relação entre a resistência por parafuso nos corpos de prova multiparafusados e a resistência por parafuso em uma ligação com um único conector, tendo assim a porcentagem de eficiência da ligação multiparafusada.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos de resistência média para os corpos de prova com cada número de parafusos, o coeficiente de variação dos resultados e o número de corpos de prova.

Tabela 2 - Resultados dos Ensaio de Ligação

Nº de parafusos	Resistência das ligações (N)	Coef. Variação (%)	Número de CPs
1	40786	7,0	6
2	74777	6,3	6
3	101103	7,6	6
4	123605	6,5	6
5	145342	3,9	6
6	174056	6,3	6
7	203662	6,8	6
8	226780	9,8	6

Fonte: Autoria Própria (2020)

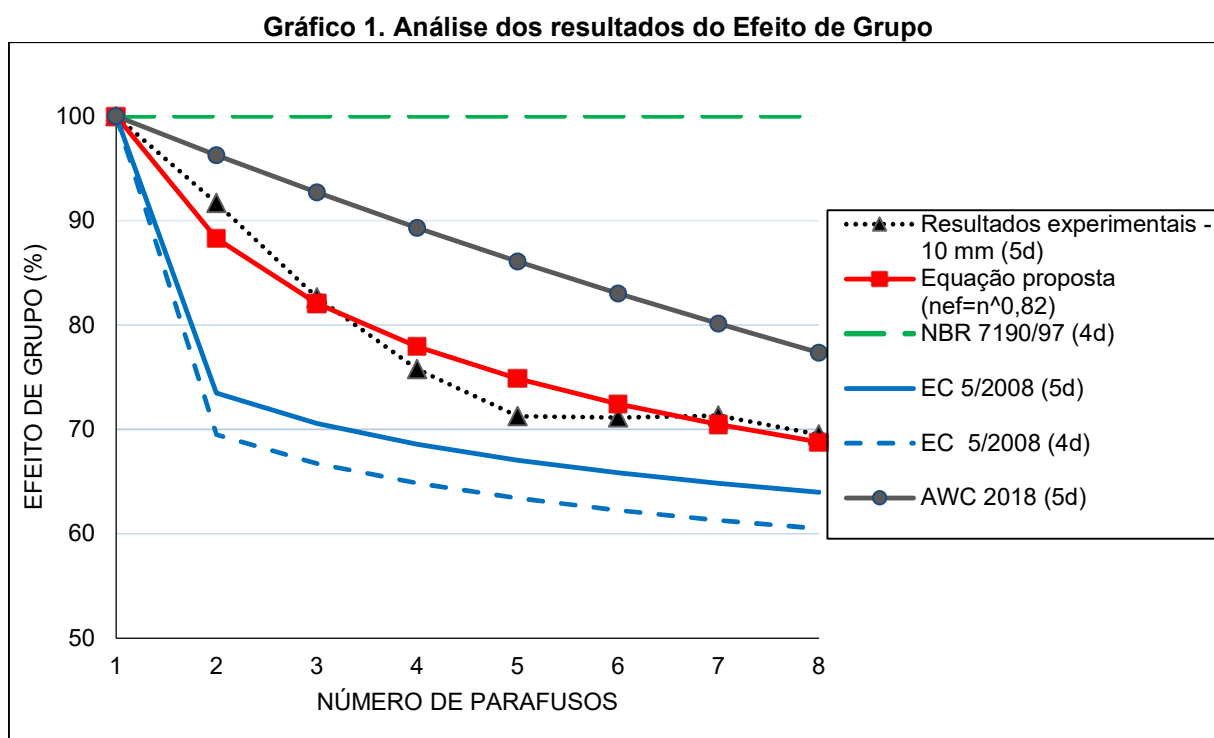
A Tabela 3 apresenta os valores do efeito de grupo para as ligações com cada número de parafusos.

Tabela 3 - Resultados Efeito de Grupo

Nº de parafusos	Resistência Média por Parafuso (N)	Efeito de Grupo (%)
1	40786	100
2	37388	92
3	33701	83
4	30901	76
5	29068	71
6	29009	71
7	29095	71
8	28348	70

Fonte: Autoria Própria (2020)

Um dos principais objetivos desse trabalho é comparar os resultados obtidos experimentalmente com os documentos normativos que regem os projetos de construções de madeira, nesse caso, o brasileiro (ABNT NBR 7190:1997), europeu (CEN EUROCODE 5:2008) e norte americano (AWC NDS 2018), o Gráfico 1 apresenta o efeito de grupo para cada um dos casos.



Fonte: Autoria Própria (2020)

Observa-se que a norma brasileira (ABNT NBR 7190:1997), representada pelo tracejado verde, subestima o efeito de grupo ao não considerar uma redução da resistência com o aumento do número de parafusos até oito. Esse critério adotado pela norma, comparado aos resultados obtidos experimentalmente mostrou-se contra a segurança.

Comparando os resultados desse trabalho com o previsto na norma europeia (CEN EUROCODE 5:2008) para o mesmo espaçamento utilizados nos experimentos, 5d, a curva azul com linha sólida do Gráfico 1, pode-se concluir que a norma europeia (CEN EUROCODE 5:2008) superestima o efeito de grupo em relação ao que foi observado nos resultados experimentais.

Comparando com a norma norte americana (AWC NDS 2018), representada pela linha cinza do Gráfico 1, os resultados experimentais obtidos nesse trabalho apresentam um efeito de grupo inferior ao proposto pela norma americana, para a madeira e tipo de conector estudados.

Quando comparados os resultados entre a própria norma europeia, curva azul sólida e azul tracejada, apenas variando o espaçamento de “5d” para “4d”, observa-se que o maior espaçamento entre conectores resulta em um menor efeito de grupo. Sendo assim a proposta de revisão da norma brasileira (PN ABNT NBR 7190:2013) de alteração do espaçamento mínimos entre conectores em linha de “4d” para “5d” poderá proporcionar maior resistência às ligações.

Com base nos resultados experimentais, propõe-se uma equação para descrever o efeito de grupo, quando o número de parafusos (n) é substituído por um número efetivo (n_{ef}), sendo o número de parafusos (n) elevado a 0,82, obtém-se a curva vermelha.

7 CONCLUSÕES

O efeito de grupo e os fatores que o influenciam necessitam de estudos mais aprofundados para entendimento do fenômeno e sua correta consideração nos projetos de madeira. São necessários mais ensaios experimentais com maior variação de fatores, visto que este trabalho trata apenas de uma espécie de madeira e um tipo de conector. Sugere-se que os trabalhos futuros avaliem o comportamento das ligações com foco no efeito de grupo em ligações submetidas a carregamentos cíclicos.

Os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa e a comparação com outros documentos normativos europeu e norte americano levam a conclusão de que a norma brasileira carece de revisão quanto à consideração do efeito de grupo.

A análise da norma europeia (CEN EUROCODE 5:2008) para diferentes espaçamentos entre parafusos em linha, permite concluir que um maior espaçamento gera um menor efeito de grupo. Portanto, a consideração de espaçamento mínimo de 5d proposta pela revisão da norma brasileira (PN ABNT NBR 7190:2013) é uma opção mais segura para os projetos de madeira.

8 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, NBR 7190 – **Projeto de estruturas de madeira**, Rio de Janeiro, 1997, 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, 2º PN REVISÃO NBR 7190 – **Projeto de estruturas de madeira**, setembro, 2013, 74 p.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. EN26891: Timber Structures. **Joints made with mechanical fasteners. General principles for determination of strength and deformation**. European Standard, Brussels, 1991.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. EUROCODE 5: **Design of Timber Structures**. Brussels, 2008.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. EN383: Timber Structures. **Test Methods. Determination of Embedding Strength and Foundation Values for Dowel Type Fasteners**. European Standard, Brussels, 1993.

BEEDLE, L.S. **Structural Steel Desing**. New York, Ronald Press. 1964.

CRAMER, C.O. **An analytical and experimental examination of wood tension joints having a large number of bolts**. Madison, WI: University of Wisconsin. Ph.D. Thesis. 1967

DOYLE, D.V. **Performance of joints with eight bolts in laminated Douglas-fir**. Res. Pap. FPL–RP–10. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 31 p. 1964

GONÇALES, N; ODA, C. **Estudo do Efeito de Grupo em ligações de madeira com parafusos passantes**. XVI Encontro Brasileiro em Madeira e em Estrutura de Madeira, III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira, 12 p. Março, 2018.

HOSSAIN, A; POPOVSKI, M; TANNERT, T; **Group Effects for Shear Connections with Self-Tapping Screws in CLT**, Jornal Struct Engeneer, 2019.

JOHANSEN, K. W. **Theory of timber connections**. International association for Bridge and Structural Engineering. Zurick. Vol. 9. 1949.

JORISSEN, A. **Double shear timber connections with dowel type fasteners**. College voor Promoties aangewezen, Technische Universiteit Delft, Paises Baixos, 1998.

LANTOS, G. **Load distribution in a row of fasteners subjected to lateral load**. Wood Sci. 1(3):129-136. Jan. 1969

MOSS, P. J. **Multiple-bolted joints in wood members: a literature review**. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–97. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 18 p. 1997.

NDS (National Design Specification) **National design specification for wood construction**. Leesburg, VA: American Wood Council, 2018.

QUENNEVILLE, P. **Sharing of the connection load within a row of bolts: From zero to ultimate load**. World Conference on Timber Engineering, 2010.

SAWATA, K. Strength of Bolted Timber Joints Subjected to Lateral Force. **Journal of Wood Science, Junho, 2015**.

SCHMID, M; BLASS, H. J; FRASSON, R. P. M. **Effect of distances, spacing and number of dowels in a row on the load carrying capacity of connections with dowels failing by splitting**. In: Internationar Council For Research And Innovation In Building And Constrution, Working Commission, CIB-W18, Kyoto, Japão, 2002. Anais eletrônicos. Kyoto, 2002, p. 35-7-7.

SMITH, I; FOLIENTE, G. **Load and Resistance Factor Design of Timber Joints: International Practice and Future Direction**. Journal of Structural Engineering, p. 48-

59. Jan. 2002.

WILKINSON, T.L. **Assessment of modification factors for a row of bolt or timber connectors**. United States Department of Agriculture, Dezembro, 1980.

WILKINSON, T. L. **Load Distribution Among Bolts Parallel to Load**. United States. Departamento f Agriculture. Setembro, 1986.

ZAHN, J J. **Design equation for multiple-fastener wood conennections**. Journal of Structural Engineering, nov. 1991.