

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RAFAEL AZAMBUJA DE DEUS

**VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA EM LIGAÇÕES DE MADEIRA COM
PARAFUSOS METÁLICOS, SUBMETIDAS A FORÇAS NORMAIS, E COM DOIS
PLANOS DE CORTE, CONFORME NBR 7190/2022**

Alegrete - RS 2023

RAFAEL AZAMBUJA DE DEUS

**VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA EM LIGAÇÕES DE MADEIRA COM
PARAFUSOS METÁLICOS, SUBMETIDAS A FORÇAS NORMAIS, E COM DOIS
PLANOS DE CORTE, CONFORME NBR 7190/2022**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Telmo Egmar Camilo Deifeld

Alegrete - RS 2023

RAFAEL AZAMBUJA DE DEUS

VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA EM LIGAÇÕES DE MADEIRA COM PARAFUSOS METÁLICOS, SUBMETIDAS A FORÇAS NORMAIS, E COM DOIS PLANOS DE CORTE, CONFORME NBR 7190/2022

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 05 de julho de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. TELMO EGMAR CAMILO DEIFELD - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA

Prof. Dr. LUIS ERNESTO ROCA BRUNO - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/07/2023, às 14:03, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **TELMO EGMAR CAMILO DEIFELD, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2023, às 20:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIS ERNESTO ROCA BRUNO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/07/2023, às 15:45, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1185612** e o código CRC **1C8666A6**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre estar junto comigo. Agradeço a minha família, meu pai Milton, minha vó Tereza e principalmente a minha mãe Jarlei por sempre acreditar em mim e não me deixar desistir jamais dos meus sonhos, amo muito vocês.

Agradeço aos meus amigos que são a minha segunda família, sempre me apoiando em todas as situações. Não vou citar nomes, pois a gente sempre acaba esquecendo alguém.

Agradeço aos meus amigos e colegas do setor de topografia: Chicão, Zeca, Caio, Zé Alexandre, Clovenir, Witalo e Jefferson(borracho), vocês contribuíram muito nessa caminhada.

Agradeço aos meus professores por toda paciência e ensinamentos, vocês me ensinaram muito, cada pequeno passo certo que concretizo na minha vida, tenho a certeza da diferença que vocês fizeram.

Agradeço especialmente ao professor Telmo, não só pelos ensinamentos e paciência durante todo o processo, também pela amizade. Ser orientado por esse cara incrível, fez eu enxergar a engenharia de forma diferente.

Por último e não menos importante, agradeço ao meu padrinho José Danilo, que já nos deixou. Nunca vou esquecer das nossas conversas e da frase que tu sempre me dizia “Rafinha, o que vale é o canudo”. Dedico especialmente pra ti cara. Sei que ainda vamos nos encontrar novamente.

"Um homem que vence, é um homem
que pensa que pode"

Roger Federer

RESUMO

É de extrema importância estudar o efeito das ligações parafusadas em madeira, pois esse tipo de ligação é uma das mais utilizadas em estruturas de madeira. As ligações parafusadas estão relacionadas diretamente a durabilidade e a segurança das estruturas. Este trabalho tem como objetivo principal verificar a segurança estrutural das ligações parafusadas com dois planos de corte submetidos a compressão paralela às fibras, visando mostrar as seguintes falhas: a) Embutimento nas chapas laterais b) Embutimento na chapa central c) Flexão simples no parafuso. Através dos parâmetros da NBR7190(2022), foram dimensionados três ligações diferentes, cada ligação com quatro corpos de prova. Posteriormente os corpos de provas foram ensaiados no laboratório afim de determinar as cargas de ruptura e compara-las com o dimensionamento. O dimensionamento foi realizado com a mesma disposição, número e diâmetros de parafusos, variando apenas a espessura das chapas de madeira. Chegou-se à conclusão que a NBR 7190(2022) oferece a segurança necessária para as ligações parafusadas em madeiras com dois planos de corte, submetidas a compressão paralela.

Palavras-chaves: Segurança estrutural, ligações parafusadas, compressão

ABSTRACT

Studying the effect of screwed connections in wood is of utmost importance, as this type of connection is one of the most commonly used in wooden structures. Screwed connections are directly linked to the durability and safety of structures. This work aims to verify the structural safety of screwed connections with two cutting planes subjected to compression parallel to the fibers, in order to demonstrate the following failures: a) Embedment in the side plates, b) Embedment in the central plate, c) Simple bending in the screw. Based on the parameters of NBR7190(2022), three different connections were designed, each with four test specimens. Subsequently, the test specimens were tested in the laboratory to determine the failure loads and compare them with the design. The design was carried out with the same arrangement, number, and diameters of screws, only varying the thickness of the wooden plates. It was concluded that NBR 7190(2022) provides the necessary safety for screwed connections in wood with two cutting planes, subjected to parallel compression.

Keywords: Structural safety, bolted connections, external

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Anisotropia na madeira nas direções radiais, tangenciais e longitudinais	18
Figura 2 – diagrama de retração ou inchamentos de três espécies vegetais, em função de grau de umidade.....	21
Figura 3 – Defeitos: (a) nó; (b) fendas; (c) gretas; (d) abaulamento; (e) arqueamento; (f) fibras reversas; (g) esmoado; (h) empenamento.....	22
Figura 4 – Tipos de ligações estruturais de peças de madeira.....	25
Figura 5 – Tipos de parafusos usados em ligações parafusadas: parafuso auto-atarraxante e parafuso com porca e arruela.....	26
Figura 6 – Parafuso sem corte simples.....	27
Figura 7 – Espaçamentos e distancias mínimas para ligações com pinos metálicos.....	35
Figura 08 – Corpos de prova para medir a densidade.....	38
Figura 09 – Pesagem dos corpos de prova.....	38
Figura 10 – Ajuste da densidade aparente através do diagrama de Kolmann.....	40
Figura 11 – Figura 11 – Croqui espaçamento dos parafusos.....	43
Figura 12 – Espessuras das chapas de madeira.....	43
Figura 13 - Parafuso Francês com Porca UNC 3/8" X 4.1/2" Classe 5.8 Ferro Zincado (Trivalente).....	44
Figura 14 – Corpos de prova finalizados.....	45
Figura 15 – Ensaio CP-EL-IV.....	46
Figura 16 – CP – EL rompidos.....	46
Figura 17 – CP – EL rompidos e com chapas separadas.....	47

Figura 18 – Gráfico força x Tempo dos CP – EL.....	47
Figura 19 – Gráfico Força x Deslocamento dos CP – EL.....	48
Figura 20 - Cargas de Ruptura dos CP – EL.....	49
Figura 21 – CP – EC rompidos.....	50
Figura 22 – CP – EC rompidos e com chapas separadas.....	50
Figura 23 – Gráfico força x Tempo dos CP – EC.....	51
Figura 24 – Gráfico Força x Deslocamento dos CP – EC.....	52
Figura 25 - Cargas de Ruptura dos CP – EC.....	53
Figura 26 – CP – FS rompidos.....	53
Figura 27 – CP – FS rompidos e com chapas cerradas.....	54
Figura 28 – Gráfico força x Tempo dos CP – FS.....	55
Figura 29 – Gráfico força x Tempo dos CP – FS.....	56
Figura 30 – Cargas de Ruptura dos CP – FS.....	57
Figura 31 - embutimento causado pelas arruelas.....	58
Figura 32 - embutimento causado pela cabeça do parafuso.....	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de umidades.....	19
Quadro 2 – Classes de resistências das espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpo de prova isentos de defeitos.....	23
Quadro 3 – Classes de Quadro 3 – Classes de resistências definidas em ensaios de peças estruturais.....	24
Quadro 4 – Valores de k_{mod1}	30
Quadro 5 – Valores de k_{mod2}	31
Quadro 6 – Força características para embutimento por plano de corte e por pino.....	32
Quadro 7– Força características para flexão por plano de corte e por pino.....	32
Quadro 8 – Espaçamentos e distâncias mínimas para ligações parafusadas.....	34
Quadro 9 – Pré-dimensionamento das ligações.....	37
Quadro 10 – Valores densidade aparente dos corpos de prova.....	39
Quadro 11 – Valor de umidade dos corpos de prova.....	39
Quadro 12 – Quadro 12 – Dimensionamento dos embutimentos nas peças e das flexões no pino.....	41
Quadro 13 – Carga de ruptura com estimativa com o efeito de confinamento.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
NBR – Norma Brasileira

USP – Universidade de São Paulo

UNB – Universidade de Brasília

EL – Embutimento na chapa lateral

EC – Embutimento na chapa central

FS – Flexão simples no pino

FM – Flexão múltipla no pino

CP – Corpo de prova

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivos gerais	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	15
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Utilização da madeira	16
2.2 Utilização da madeira como material estrutural	16
2.3 Classificação das madeiras	17
2.3.1 Propriedades físicas da madeira	18
2.3.2 Anisotropia da madeira	18
2.3.3 Umidade da madeira	19
2.3.4 Retração da madeira	20
2.3.5 Propriedades mecânicas da madeira.....	21
2.3.6 Defeitos da madeira	21
2.4 Módulo de elasticidade	22
2.4.1 Módulo de elasticidade longitudinal paralelo as fibras	23
2.4.2 Módulo de elasticidade longitudinal normal às fibras	23
2.5 Classes de resistência da madeira	23
2.6 Ligações em madeira	24
2.6.1 Ligações parafusadas em madeira	25
2.7 Resistência dos parafusos	27
2.8 Rigidez das ligações	28
2.9 Pré-furação	28
2.10 Valores representativos da madeira	28
2.10.1 Valores médios	28
2.10.2 Valores característicos	28
2.10.3 Valores de cálculo	29
2.11 Coeficiente de modificação da madeira	29
2.12 Critérios de dimensionamento	31
2.13 Espaçamento em ligações parafusadas	33
3 METODOLOGIA	36
3.1 Introdução	36

3.2 Materiais e equipamentos	36
3.3 Dimensionamento dos corpos-de-prova	37
3.4 Confeção e ensaio dos corpos de prova.....	43
4 RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	46
5 CONCLUSÃO.....	62
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

A madeira vem sendo utilizada como material construtivo há muitos séculos, com uma grande gama de sistemas construtivos, que evoluem na medida que novos produtos industrializados são comercializados (Pfeil e Pfeil 2003). Do ponto de vista estrutural, sabe-se que uma estrutura de madeira pode ser solicitada através de compressão paralela às fibras, compressão normal às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento, além de outras propriedades. (GESUALDO 2003),

Oliveira (2001) afirma que grandes estruturas de madeira, necessitam de peças maciças e com dimensões raramente encontradas. Para que grandes estruturas sejam dimensionadas, necessita unir elementos atendendo as solicitações mecânicas, oferecendo resistência, durabilidade e segurança. Atualmente, a NBR 7190(2022) referente a estruturas de madeiras, cita ligações por meio de pinos metálicos, cavilhas e conectores. O uso da madeira como elemento estrutural, com o passar do tempo, tem sido relacionado à eficácia das ligações, conhecimento dos materiais e pela sua funcionalidade estrutural.

Sabendo da importância das ligações em estruturas de madeira, este trabalho busca testar o efeitos das ligações parafusadas, submetidas a compressão paralela as fibras. Comparando os resultados com a NBR 7190(2022). Afim de um melhor aproveitamento e segurança nas estruturas de madeiras.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste na determinação da resistência das ligações parafusadas, submetidas a compressão através dos cálculos de dimensionamento segundo a NBR 7190(2022) e compara-los com as cargas de rupturas obtidas em ensaios.

1.1.2 Objetivo específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- I. Realizar o dimensionamento de ligações parafusadas de acordo com a NBR 7190(2022), submetidas a compressão, com diferentes disposições de ligações obtendo assim cargas de rupturas diferentes.
- II. Realizar os ensaios do item I no laboratório.
- III. Comparar os valores de resistência de ruptura do item I e II.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Utilização da madeira

Segundo Correia (2009), além das suas propriedades mecânicas e físicas, a madeira é eficiente estruturalmente também por ser um material sustentável em relação as fases do ciclo da vida útil de uma estrutura. Por se tratar de um recurso natural e abundante, sua extração da natureza deve ser feita de maneira correta e responsável, desde sua extração até sua utilização.

Zenid (2011) afirma que 80% da utilização da madeira retirada da Amazônia é consumida pelo mercado nacional. A matéria-prima concentra-se em poucas espécies, causando assim grandes danos sobre as florestas nativas.

“Em suma, a madeira é um material estrutural durável e de grande apelo arquitectónico. Oferece possibilidades ilimitadas, e a curto prazo promete tornar-se um material estrutural desafiador. É um material fácil de utilizar, possui um equilíbrio ecológico bastante positivo e tem uma resistência comparável com o betão armado e o aço. É um material inflamável mas cuja resistência ao fogo é plenamente calculável. O maior esforço, contudo é requerido, na expansão deste, como material estrutural, na comunidade técnica.” (CORREIA, 2009, p. 2).

De acordo Zenid (2011), a madeira é usada de forma temporária como formas para concreto, escoras e andaimes. De forma definitiva, além de elemento estrutural, é usada nas estruturas de cobertura, nas esquadrias, nos forros e no piso.

2.2 Utilização da madeira como material estrutural

Correia (2009) diz que a madeira é um dos materiais utilizados na construção civil, bastante sustentável. Apresenta alta razão resistência/peso específico, apresentando uma resistência razoavelmente elevada a esforços de

tração e compressão, conseqüentemente, também possui um bom comportamento diante flexão.

De acordo com Cordeiro Júnior, Rocha Silva e Soares(2017), a madeira pode ser utilizada de várias maneiras na construção civil, na forma estrutural(definitiva) através de fundações, coberturas, pilares e vigas, também na forma de suporte(temporária) como escoras, formas, esquadrias, andaimes e até mesmo barracões temporários na obra.

2.3 Classificação das madeiras

Segundo (Pfeil e Pfeil 2003), as madeiras utilizadas na construção civil como elemento estrutural são obtidas através de troncos de árvores. Existem duas categorias principais:

- Madeiras duras (hardwood) – Essa madeira é derivada de árvores folhosas (dicotiledônias, da classe angiosperma, possui folhas achatadas e largas), o crescimento nessas espécies é lento. Alguns exemplos dessas árvores são: peroba, ipê, aroeira, carvalho. É chamada de madeira de lei as madeiras duras de melhor qualidade.
- Madeiras macias (softwood) – Geralmente vinda das árvores coníferas (classe gimnosperma, possui folhas em forma de escama ou agulhas, as sementes juntas em forma de cone), possui crescimento acelerado. Alguns exemplos dessas árvores são: pinheiros europeus, pinheiro-do-paraná, pinheirinho.

As árvores folhosas perdem suas folhas no outono, enquanto as coníferas mantem suas folhas verdes durante o ano inteiro. A principal diferença entre as duas categorias não está na sua resistência em si e sim na sua estrutura celular (Pfeil e Pfeil 2003).

2.3.1 Propriedades físicas da madeira

Calil (1999) explica que conhecer as propriedades físicas da madeira é essencial para uma melhor utilização como material estrutural, essas propriedades têm influência direta no desempenho e resistência da madeira.

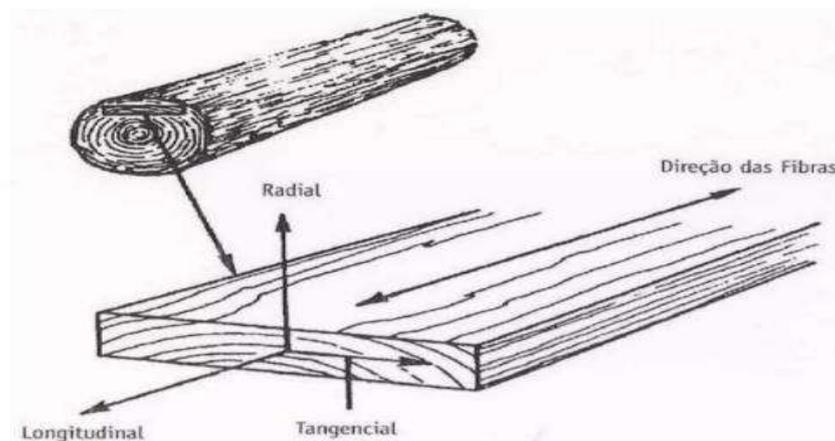
Calil (1999) ainda cita fatores que influenciam nas propriedades físicas:

- Classificação botânica,
- O solo e o clima da região de origem da árvore,
- Fisiologia da árvore,
- Anatomia do tecido lenhoso,
- Variação da composição química.

2.3.2 Anisotropia da madeira

A madeira é um material anisotrópico devido a diferença das propriedades nas suas três direções. São elas longitudinais, radiais e tangenciais. A diferença nas propriedades nas direções tangencial e radial não tem relevância no dimensionamento, deve se levar em conta as propriedades na direção das fibras principais(longitudinal) e na direção perpendicular as mesmas fibras.(Pfeil e Pfeil 2003) A figura 1 abaixo representa a anisotropia da madeira.

Figura 1 – Anisotropia na madeira nas direções radiais, tangenciais e longitudinais



2.3.3 Umidade da madeira

Pfeil (2003) explica que a umidade tem grande relevância nas propriedades físicas da madeira. Classificamos o grau de umidade U, através da massa da água incorporada no interior da madeira. Calcula-se um percentual comparando massa da água e massa da madeira seca em estufa m_s (até a estabilização do peso)

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100$$

$U(\%)$ = Percentual de umidade

m_i = massa inicial da madeira

m_s = massa da madeira seca na estufa

Um projeto de estruturas de madeiras deve ser dimensionado classificando uma das classes de umidade especificadas no quadro 1. (NBR 7190(2022))

Quadro 1 – Classes de umidades.

CLASSES DE UMIDADE	UMIDADE RELATIVA DO AMBIENTE	UMIDADE DE EQUILIBRIO DA MADEIRA
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% \leq U < 75\%$	15%
3	$75\% \leq U < 85\%$	18%
4	$> 85\%$ durante longos tempos	$> 25\%$

Fonte: (NBR 7190(2022)).

Segundo (MANRIQUEZ, 2012), as classes obtidas na tabela 1 tem a função de ajustar as propriedades de resistência e rigidez em função do ambiente. A umidade, massa específica, tipos de água presente na madeira, contração e inchamento, afetam diretamente as propriedades físicas da madeira.

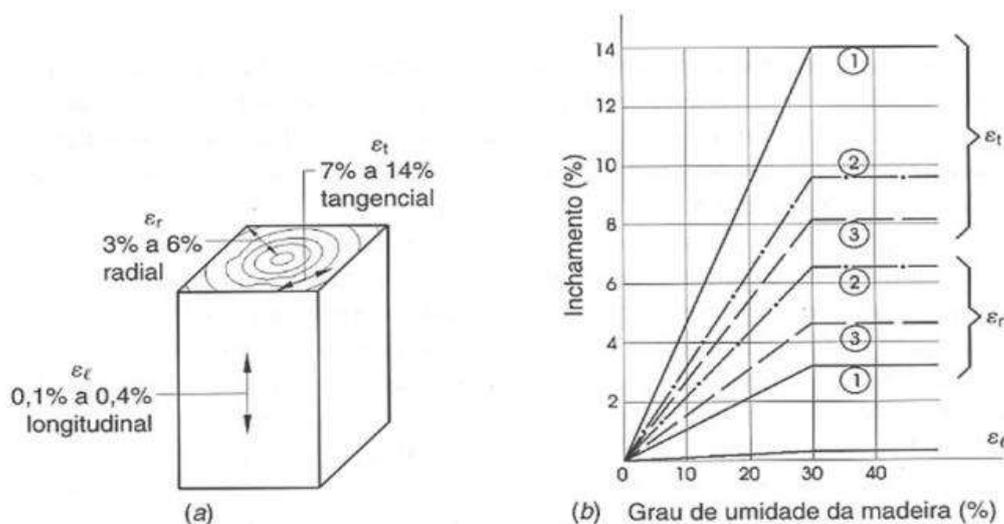
2.3.4 Retração da madeira

Segundo(Kollmann), as dimensões da madeira se alteram de acordo com a variação da umidade, no intervalo de 0% até o ponto de saturação das fibras.

“As madeiras sofrem retração ou inchamento com a variação de umidade entre 0% e o ponto de saturação das fibras(30%), sendo a variação dimensional aproximadamente linear. O fenômeno é mais importante na direção tangencial; para a redução de umidade de 30% até 0%, a retração tangencial varia de 5% a 10% da dimensão verde, conforme as espécies. A retração na direção radial é cerca da metade da direção tangencial. Na retração longitudinal, a retração é menos pronunciada, valendo apenas de 0,1% a 0,3% da dimensão verde, para secagem de 30% a 0%. A retração volumétrica é aproximadamente igual a soma das três retrações lineares ortogonais.” (PFEIL e PFEIL, 2003, p. 5)

A figura 2 abaixo mostra os gráficos e esquemas das retrações ou inchamento.

Figura 2 – diagrama de retração ou inchamentos de três espécies vegetais, em função de grau de umidade.



Fonte: (Pfeil e Pfeil 2003,pág 5).

2.3.5 Propriedades mecânicas da madeira

Calil (1999) diz que as propriedades mecânicas das madeiras são divididas em propriedades de elasticidade e propriedades de resistência, e são determinados através da aplicação de forças externas no elemento.

Por ser um material ortotrópico, as propriedades mecânicas apresentam variações de acordo com a direção das fibras em relação a aplicação da força (Calil, 1999).

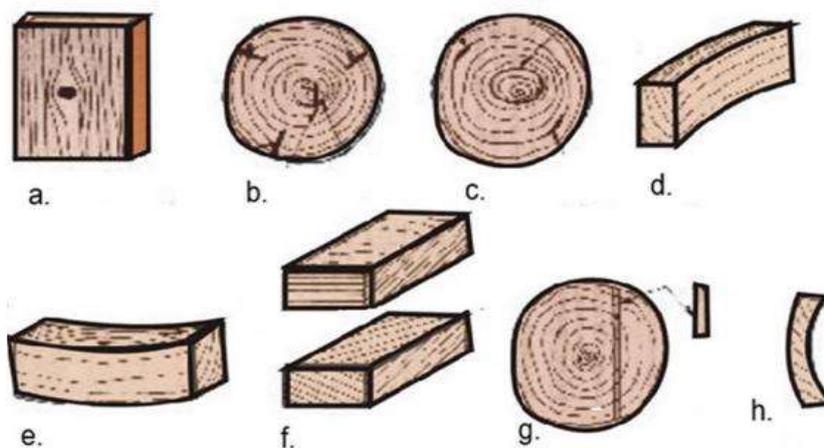
2.3.6 Defeitos da madeira

Pfeil e Pfeil (2003) afirma que a madeira utilizada na construção civil possui vários defeitos que prejudicam seu desempenho. Os defeitos têm como origem da própria constituição do tronco ou ainda do processo de fabricação das peças. Abaixo, os principais defeitos da madeira:

- **Nós:** Imperfeição da madeira nos pontos dos troncos onde existiam galhos.
- **Fendas:** Aberturas nas extremidades das peças, causadas pela secagem mais rápida da superfície.
- **Gretas ou ventas:** Separação entre os anéis anuais, provocadas por tensões internas devidas ao crescimento lateral da árvore, ou por ações externas como flexão.
- **Abaulamento:** Encurvamento na direção da largura da peça.
- **Arqueadura:** Encurvamento na direção do comprimento da peça.
- **Fibras reversas:** Fibras não paralelas ao eixo da peça. Podem ser provocadas por causas naturais ou por serragem.
- **Esmoada ou quina morta:** Canto arredondado causado pela estrutura natural do tronco.

Os defeitos citados podem ser vistos na figura 3.

Figura 3 – Defeitos nas madeiras: (a) nó, provocando inclinação nas fibras; (b) Fendas periféricas; 2 a 4 - Fendas no cerne; (c) Gretas: 1 - greta parcial; 2 - greta completa; (d) abaulamento; (e) arqueamento; (f) fibras reversas; (g) esmoado; (h) empenamento.



Fonte: Adaptado de Laroca (2022)

2.4 Módulo de elasticidade (E)

De acordo com (GESUALDO, 2003), utilizam-se diversos módulos de elasticidade para madeiras, de acordo com a sua espécie e com a direção da sua solicitação em relação as fibras. O valor base é o módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela as fibras. Os valores a seguir são alguns diferentes módulos de elasticidade da madeira. Esses valores são definidos de acordo com seu tipo de solicitação: compressão paralela e normal, flexão. A NBR 7190/(2022) considera que o modulo de elasticidade para compressão (E_c) é igual para o modulo de elasticidade para tração (E_t), ou seja, $E_t = E_c$.

2.4.1 Módulo de elasticidade longitudinal paralelo as fibras (E_0)

A norma recomenda ensaios em laboratório para o módulo de elasticidade longitudinal, não sendo possível o ensaio a norma possui valores tabelados na TABELA – 2 da NBR 7190-1(2022).

2.4.2 Módulo de elasticidade longitudinal normal às fibras (E_{90})

Podemos obter através de ensaios ou como parte do valor de (E_0), através da relação:

$$(E_{90}) = \frac{(E_0)}{20}$$

2.5 Classes de resistência da madeira

As classes de resistência das madeiras têm por objetivo a escolha de madeiras com propriedades padronizadas, orientando a escolha do material para dimensionar os projetos estruturais. As classes de resistências podem ser classificadas de acordo com os quadros 2 e 3.

Quadro 2 – Classes de resistências das espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpo de prova isentos de defeitos.

CLASSES	f_{c0k} MPa	$f_{v0,k}$ MPa	$E_{c0,med}$ MPa	Densidade a 12 % kg/m ³
D20	20	4	10000	500
D30	30	5	12000	625
D40	40	6	14500	750
D50	50	7	16500	850
D60	60	8	19500	1000
NOTA 1 Os valores desta Tabela foram obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190-3. NOTA 2 Valores referentes ao teor de umidade igual a 12 %. NOTA 3 Os valores das classes de resistência para espécies nativas estão disponíveis na ABNT NBR 7190-3:2022,Tabela A.1.				

Fonte: (NBR 7190/2022, pág 12).

Quadro 3 – Classes de resistências definidas em ensaios de peças estruturais.

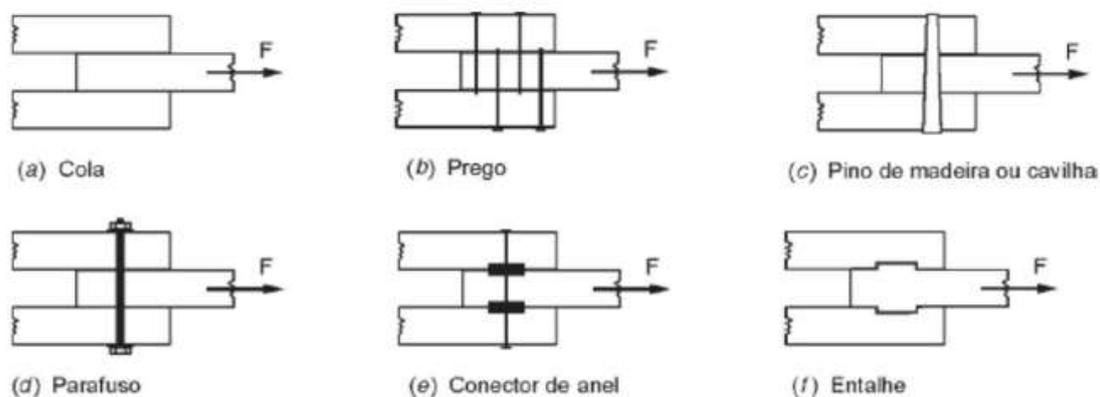
		Coníferas						Folhosas			
PROPRIEDADES DE RIGIDEZ (GPa)											
		C14	C18	C22	C27	C35	C45	D18	D30	D40	D60
Módulo de Elasticidade a 0° médio	E _{0,m}	7	9	10	12	13	15	9,5	11	13	17
Módulo de Elasticidade a 0° característico	E _{0,05}	4,7	6	6,7	7,7	8,7	10	8	9,2	11	14
Módulo de Elasticidade a 90° médio	E _{90,m}	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,1
Módulo de Elasticidade Transversal médio	G _m	0,4	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	0,6	0,7	0,8	1,1
Densidade (kg/m ³)											
Densidade Característica	ρ _k	290	320	340	370	400	440	475	530	560	700
Densidade Característica	ρ _m	350	380	410	450	480	520	570	640	660	840
Nota 1 Valores obtidos conforme a ABNT NBR 7190-4.											
Nota 2 Valores referentes ao teor de umidade igual a 12 %											

Fonte: (Adaptado NBR 7190/2022, pág 12).

2.6 Ligações em madeira

Segundo Pfeil e Pfeil (2003), O tamanho das peças de madeiras tem seu tamanho limitado devido ao tamanho das árvores e dificuldade no meio de transporte. Para ser utilizada como estrutura, a madeira precisa ser ligada entre si através de dispositivos. Os principais dispositivos são: colagem, pregos, grampos, braçadeiras, pinos, parafusos, conectores metálicos, tarugos e entalhes. Os principais estão ilustrados na figura 4.

Figura 4 – Tipos de ligações estruturais de peças de madeira



Fonte: (Pfeil e Pfeil 2003, pág 52).

De acordo com Pfeil e Pfeil (2003), o requisito mais importante de uma ligação é a resistência, transmitindo forças de um elemento para o outro. Outro requisito importante das ligações é a rigidez, podendo assim restringir o deslizamento desses elementos evitando prejudicar o funcionamento da estrutura.

2.6.1 Ligações parafusadas em madeira

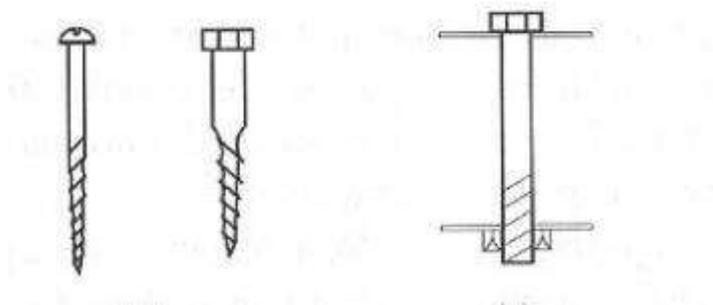
Pfeil e Pfeil (2003) diz que dois tipos de parafusos são usados em ligações em madeira:

- Parafusos rosqueados auto-atarraxantes;
- Parafusos com porca e arruelas

Parafusos auto-atarraxantes tem seu uso limitado em marcenaria ou para prender algum tipo de acessório metálico em postes. Nas ligações estruturais

em madeiras, utiliza-se parafusos cilíndricos e lisos, sempre numa extremidade a cabeça do parafuso e na outra uma rosca e porca. Esses parafusos são instalados com uma folga de 1 mm a 2 mm para depois serem apertados com a porca. As arruelas metálicas servem para reduzir a pressão de apoio. Na figura 5, os dois tipos de parafusos citados.

Figura 5 – Tipos de parafusos usados em ligações parafusadas: parafuso auto-atarraxante e parafuso com porca e arruela



Fonte: (Pfeil e Pfeil 2003,pág 53).

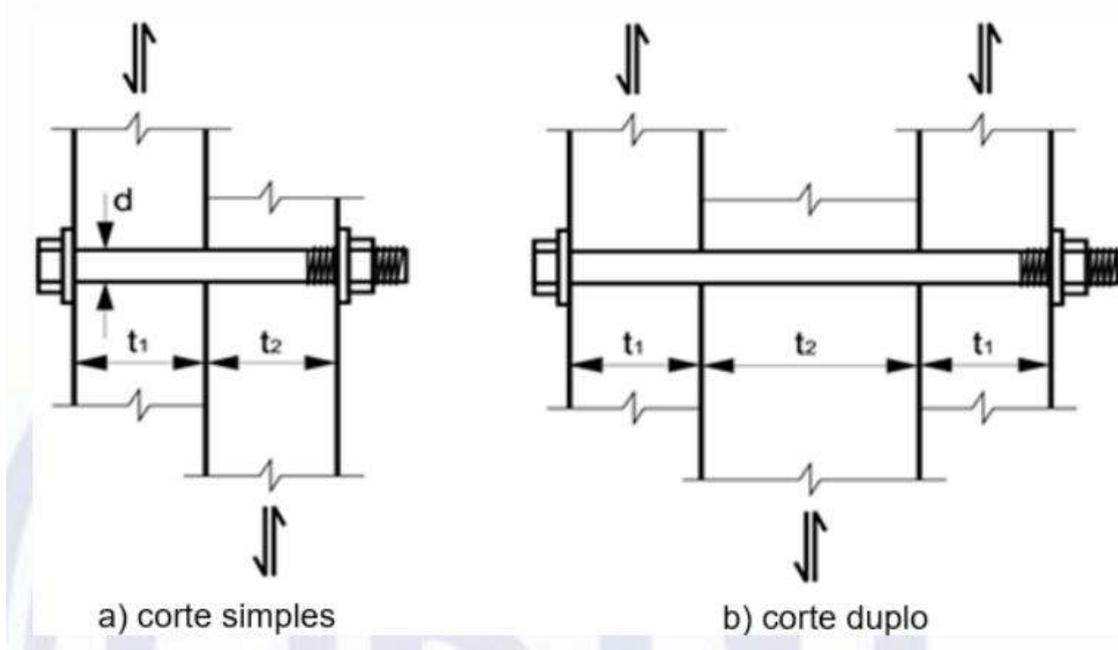
Segundo a NBR 7190(2022), o critério de dimensionamento de ligações por parafusos tem como conceito a relação entre espessura da madeira, diâmetro do pino, resistência ao embutimento e a tensão de escoamento do parafuso, assim podemos determinar o comportamento da ligação, podendo deformar pelo embutimento da madeira ou pela flexão do parafuso.

2.7 Resistencia dos parafusos

Segundo a NBR 7190(2022), a resistência de um parafuso é determinada pelo somatório das resistências de suas diferentes seções de cortes. Os parafusos estruturais não devem ter diâmetro menor que 10mm e resistência característica de escoamento(f_{yk}) de pelo menos 240 MPa.

A resistência de um parafuso correspondente a uma seção de corte entre duas peças de madeiras é calculada através da resistência de embutimento (f_{wed}) das duas madeiras interligadas, da resistência de escoamento (f_{yd}) do parafuso, do diâmetro (d) do parafuso e de uma espessura (t) tomada pela menor das espessuras t_1 e t_2 de penetração do parafuso em cada um dos elementos interligados, como mostra a figura 6.

Figura 6 – Parafusos em corte simples



Fonte: (NBR 7190(2022), pág 57).

2.8 Rigidez nas ligações

Segundo a NBR 7190(2022), nunca serão dimensionadas ligações parafusadas com apenas um parafuso. Ligações com dois ou mais parafusos, são consideradas deformáveis sendo restrito seu uso apenas em estruturas isostáticas. As ligações parafusadas com quatro ou mais parafusos, podem ser consideradas rígidas ou deformáveis dependendo do diâmetro adotado na pré-furação, visto no item 2.9.

2.9 Pré-furação nas ligações parafusadas

A NBR 7190(2022) prescreve que a pré-furação em ligações de madeira com parafusos passantes, deve ser realizada com o diâmetro mínimo do diâmetro do parafuso e com diâmetro máximo com o diâmetro do parafuso + 1 mm.

2.10 Valores representativos da madeira

2.10.1 Valores médios

O valor X_m de uma propriedade qualquer da madeira é determinado pela média aritmética dos valores que correspondem a um lote do material.

2.10.2 Valores característicos

De modo geral, salvo alguma especificação, o valor característico de uma propriedade qualquer da madeira X_k , seja admitido como o valor de $X_{k,inf}$, que é o valor que tem apenas 5% de probabilidade de não ser atingido em um dado lote do material.

2.10.3 Valores de cálculo

O valor X_d de uma propriedade qualquer da madeira é obtido através do valor X_k , através da equação 1.

Equação 1

$$X_d = K_{mod} \frac{X_k}{\gamma_w} \quad (1)$$

Em que:

X_d = valor de cálculo da madeira

K_{mod} = Coeficiente de modificação da madeira

X_k = Valor característico da madeira

w = Coeficiente de minoração das propriedades da madeira

Segundo a NBR 7190(2022), o coeficiente de minoração das propriedades da madeira e tem o valor básico de $\gamma_w = 1,8$.

2.11 Coeficiente de modificação da madeira

De acordo com a norma brasileira, o coeficiente de modificação (k_{mod}) altera os valores de cálculo das propriedades da madeira em função do carregamento que a estrutura está sofrendo, da classe de umidade, e do emprego da madeira de segunda qualidade. O k_{mod} é calculado através da equação 2.

$$k_{mod} = k_{mod1}k_{mod2} \quad (2)$$

O coeficiente parcial de modificação (k_{mod1}) é determinado através do quadro 4 abaixo e leva em consideração o carregamento e o tipo de material empregado.

Quadro 4 – Valores de k_{mod1} .

Classes de carregamento	Ação variável principal da combinação		Tipos de madeira	
	Duração acumulada	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica	Madeira serrada Madeira Roliça Madeira Lamelada colada (MLC) Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) Madeira Laminada Colada (LCL)	Madeira Recompоста
Permanente	Permanente	Mais de dez anos	0,6	0,3
Longa duração	Longa duração	Seis meses a dez anos	0,7	0,45
Média duração	Média duração	Uma semana a seis meses	0,8	0,65
Curta duração	Curta duração	Menos de uma semana	0,9	0,9
Instantânea	Instantânea	Muito curta	1,1	1,1

Fonte: (NBR 7190/2022, pág 14).

O coeficiente parcial de modificação (k_{mod2}) leva em conta a classe de umidade e o tipo de material empregado, a norma define um caso particular de madeira serrada submersa, onde admite-se $k_{mod1} = 0,65$. Para outros casos definimos através do quadro 5.

Quadro 5 – Valores de k_{mod2} .

Classes de Umidade	Madeira serrada Madeira Roliça Madeira Lamelada colada (MLC) Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) Madeira Laminada Colada (LCL)	Madeira recomposta
1	1	1
2	0,9	0,95
3	0,8	0,93
4	0,7 ^a	0,9
^a Não é permitido o uso do MLCC para classe de umidade (4).		

Fonte: (NBR 7190(2022), pág 15).

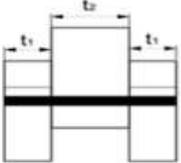
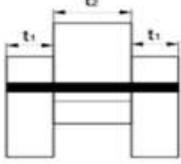
2.12 Critérios de dimensionamento

Segundo a NBR7190, a resistência de um parafuso em relação a uma seção de corte depende diretamente das características abaixo:

- Resistência ao embutimento da madeira (f_{wed})
- Resistência característica de um pino correspondente a uma dada seção de corte ($F_{v,RK}$)
- Resistência característica à tração do aço ($F_{u,k}$)
- O valor de $F_{ax, RK} / 4$ é a contribuição do efeito de confinamento, limitado ao percentual de 25% para parafusos ($F_{ax,RK}$)
- Diâmetro do parafuso (d)
- Espessura relativa a seção de corte correspondente (t)
- Valor característicos do momento do escoamento do pino ($M_{y,k}$)
- O valor de β é a razão entre as resistências de embutimento das peças de madeira

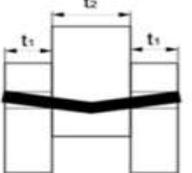
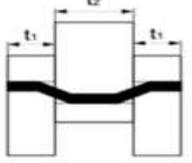
Nos quadros 6 e 7 podemos observar os critérios de dimensionamento das ligações.

Quadro 6 – Força características para embutimento por plano de corte e por pino

	$F_{V,RK1} = f_{e1,k} t_1 d \quad (3)$
	$F_{V,RK2} = 0,5 f_{e1,k} t_2 d \quad (4)$

Fonte: (Adaptado NBR 7190(2022), pág 59).

Quadro 7– Força características para flexão por plano de corte e por pino

	$F_{v,RK3} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) \frac{4\beta(2+\beta)M_{yk}}{f_{e1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,RK}}{4} \quad (5)$
	$F_{v,RK4} = 1,15 \sqrt{\frac{(2+\beta)}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,kf_{e1,k}} d} + \frac{F_{ax,RK}}{4} \quad (6)$

Fonte: (Adaptado NBR 7190(2022), pág 60)

O valor de β representa a razão entre as resistências de embutimento das peças de madeiras interligadas dadas pela equação 7.

$$\beta = \frac{f_{e2,k}}{f_{e1,k}} \quad (7)$$

O valor $F_{ax,Rk}/4$ é a contribuição do efeito de confinamento provocado pela compressão das arruelas nas laterais externas da ligação. A NBR 7190(2022) diz que para o caso de ligações com parafusos passantes, o valor $F_{ax,Rk}$ pode ser estimado pelo menor valor dentre a resistência de tração do parafuso e a resistência ao embutimento da arruela da madeira. O uso da contribuição do efeito do confinamento somente é recomendado pela NBR 7190(2022) após investigação experimental que comprove o fenômeno, portanto foi desconsiderada nesse trabalho.

A NBR 7190(2002) diz que na ausência do ensaio de resistência ao embutimento à solicitação de pinos, permite-se utilizações da equação 8 para parafusos de até 30 mm.

$$f_{e0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (8)$$

2.13 Espaçamentos em ligações parafusadas

Segundo a NBR7190(2022), os espaçamentos mínimos para ligações parafusadas são os apresentados no quadro 8:

Quadro 8 – Espaçamentos e distâncias mínimas para ligações parafusadas.

Espaçamento ou distância	Ângulo α	Parafusos passantes, parafusos de rosca soberba e parafusos ajustados
Espaçamento a_1 (paralelo às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + 3 \cos \alpha) d$
Espaçamento a_2 (perpendicular às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$4d$
Distância $a_{3,t}$ (extremidade carregada)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	Maior entre $7d$ e 80 mm
Distância $a_{3,c}$ (extremidade não carregada)	$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ $150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$ $210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$(1 + 6 \sin \alpha) d$ $4d$ $(1 + 6 \sin \alpha) d$
Distância $a_{4,t}$ (borda lateral carregada)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	Maior entre: $\begin{cases} (2 + 2 \sin \alpha) d \\ 3d \end{cases}$
Distância $a_{4,c}$ (borda lateral não carregada)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

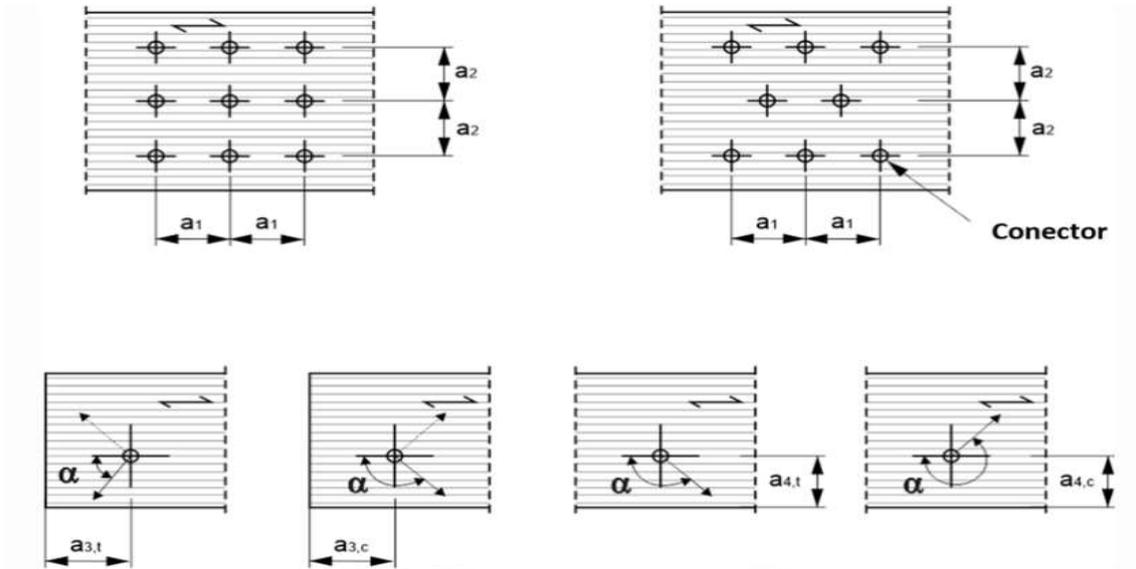
Fonte: (Adaptado NBR 7190(2022), pág 60)

Os índices usados no quadro 8 são assim denificados:

- a_1 é o espaçamento entre o centro de dois conectores situados em uma mesma linha paralela a direção das fibras;
- a_2 é o espaçamento entre os centros de dois conectores situados em duas linhas perpendiculares a direção das fibras;
- $a_{3,c}$ é a distância do centro do conector à extremidade não carregada peça;
- $a_{3,t}$ é a distância do centro do conector à extremidade carregada peça;
- $a_{4,c}$ é a distância do centro do conector à borda lateral não carregada da peça;
- $a_{4,t}$ é a distância do centro do conector à borda lateral carregada da peça;
- α é o ângulo entre a força e a direção das fibras..

Estes espaçamentos estão representados na figura 7.

Figura 7 – Espaços e distâncias mínimas para ligações com pinos metálicos



Fonte: (NBR 7190(2022), pág 54)

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Com a finalidade verificar os diferentes tipos de falhas à compressão paralela às fibras em ligações de madeira, com dois planos de cortes, realizada com parafusos metálicos, foram ensaiadas três ligações com diferentes geometrias dos elementos ligados, sendo que para cada ligação foram testados quatro corpos de provas (CP). Os diferentes tipos de ruptura, foram classificados em embutimento na peça central (EC), embutimento nas peças laterais(EL) e Flexão em um ponto no pino(FS). As disposições dos parafusos foram mantidas iguais, sendo variadas apenas as espessuras das chapas de madeira para assim atingir os três tipos de falhas. Inicialmente, o propósito inicial do trabalho era mostrar os 4 tipos de falhas apresentados na NBR 7190/(2022), não sendo possível pois não foi encontrada na madeira a espessura necessária para o dimensionamento realizado para a falha por Flexão em vários pontos no pino “FM”.

3.2 Materiais e equipamentos

Abaixo os equipamentos e materiais utilizados nos ensaios:

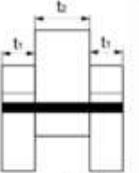
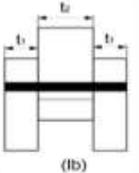
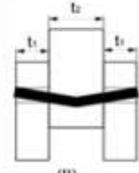
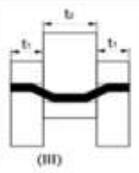
- Peças de madeira da espécie *Eucalyptus alba* (Eucalipto-branco);
- Máquina de ensaio universal: Modelo EMIC 23-200, capacidade de carga de 200kN;
- Balança de precisão
- Parafuso Francês com Porca UNC 3/8" X 4.1/2" Classe 5.8 Ferro Zincado (Trivalente);
- Lápis
- Escalímetro
- Furadeira

3.3 Dimensionamento dos corpos de prova

Os corpos de provas foram dimensionados de acordo com a NBR 7190(2022), utilizando a madeira *Eucalyptus alba*(Eucalipto-branco) e o parafuso francês. Todas as disposições foram realizadas com quatro parafusos de diâmetro mínimo exigido para facilitar os espaçamentos previstos na NBR 7190(2022). O diâmetro mínimo exigido pela norma para ligações estruturais é 3/8" ou 9,52 mm.

Primeiramente foi realizado o pré-dimensionamento com a densidade da madeira estimada de 500 kg/m³, muito abaixo da média das madeiras *Eucalyptus alba*. O quadro 9 mostra as espessuras de madeira que se obteve as 4 formas de falhas através do pré-dimensionamento.

Quadro 9 – Pré-dimensionamento das ligações

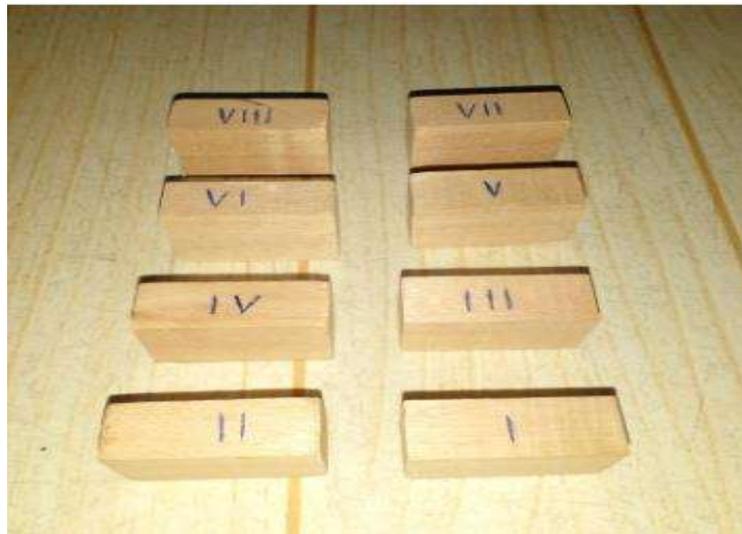
 <p>(Ia)</p>	t1	12,5	mm	 <p>(Ib)</p>	t1	25	mm
	t2	50	mm		t2	25	mm
	d	9,52	mm		d	9,52	mm
	FV,RK1	29,43	kN		FV,RK1	29,43	kN
 <p>(II)</p>	t1	25	mm	 <p>(III)</p>	t1	70	mm
	t2	50	mm		t2	70	mm
	d	9,52	mm		d	9,52	mm
	FV,RK1	42,84	kN		FV,RK1	64,71	kN

Fonte: (Do autor)

Como a densidade aparente da madeira é diretamente relacionada à umidade, a NBR 7190(2022) diz que deve ser feito o ajuste na densidade

aparente baseado na umidade. Primeiramente, foram confeccionados oito corpos de prova nas dimensões 2 cm x 3 cm x 5 cm mostrados na figura 08.

Figura 08 – Corpos de prova para medir a densidade



Fonte: (Do autor)

Os corpos de provas foram pesados para calcular a densidade aparente, utilizando uma balança de precisão, como mostrado na figura 09.

Figura 09 – Pesagem dos corpos de prova



Fonte: (Do autor)

Com os valores de pesagem foi possível calcular a densidade aparente dos corpos de prova. No cálculo da densidade aparente não foram considerados os corpos de prova CPIII e CPIV, devido a discrepâncias em relação à média obtida. Chegou-se ao valor de densidade aparente de 575,50 kg/m³, mostrado no quadro 10.

Quadro 10 – Valores densidade aparente dos corpos de prova

DENSIDADE				
CP	m(g)	v(m ³)	ρ (kg/m ³)	ρ media(kg/m ³)
I	17,42	0,00003	580,67	575,50
II	17,23	0,00003	574,33	
III	16,99	0,00003	566,33	
IV	19,11	0,00003	637,00	
V	17,42	0,00003	580,67	
VI	17,1	0,00003	570,00	
VII	17,28	0,00003	576,00	
VIII	17,14	0,00003	571,33	

Fonte: (Do autor)

Depois de calculado o valor da densidade média, foi necessário medir a umidade para ajustar a densidade aparente. Com a massa inicial (m_i) já conhecida, os corpos de provas foram colocados na estufa a 105°C, durante a secagem, a massa de cada corpo de prova foi medida de 6 em 6 horas até que a variação da massa entre duas medidas subsequentes fosse inferior a 0,5 %. Chegou-se ao valor de umidade de 14,29%, como mostrado no quadro 11.

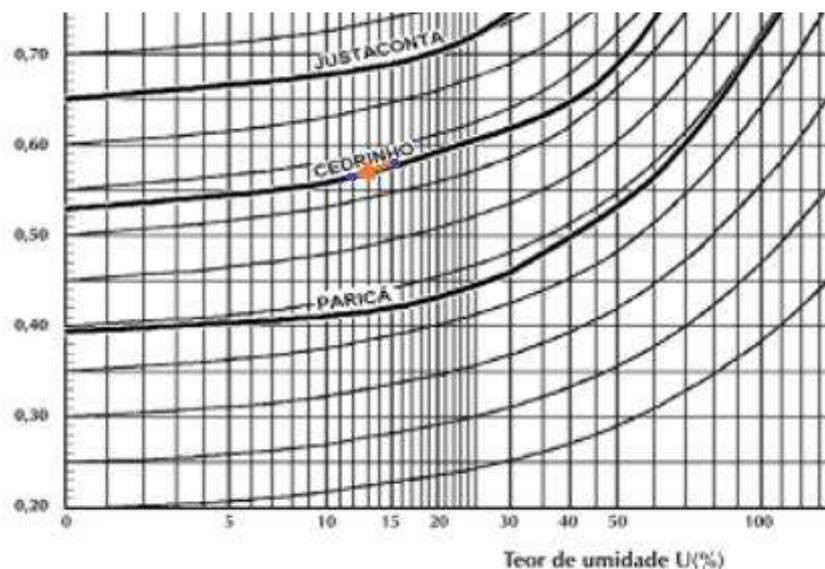
Quadro 11 – Valor de umidade dos corpos de prova

UMIDADE						
CP	m_i (g)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_s	U(%)	Média U(%)
I	17,42	15,66	15,31	15,25	14,23	14,29
II	17,23	15,51	15,07	15,03	14,64	
III	16,99	15,21	14,84	14,81	14,72	
IV	19,11	17,28	16,78	16,71	14,36	
V	17,42	15,63	15,29	15,25	14,23	
VI	17,1	15,37	15,03	14,98	14,15	
VII	17,28	15,64	15,2	15,15	14,06	
VIII	17,14	15,39	15,01	14,98	14,42	

Fonte: (Do autor)

A NBR 7190(2022) preconiza que eventuais ajustes nos valores das densidades aparentes devem ser feitos através do diagrama de Kollmann. Apesar da curva coincidir com a madeira cedrinho, são duas madeiras diferentes. Chegou-se ao valor de densidade aparente de 560 kg/m^3 , mostrado na figura 10.

Figura 10 – Ajuste da densidade aparente através do diagrama de Kolmann

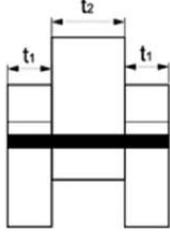
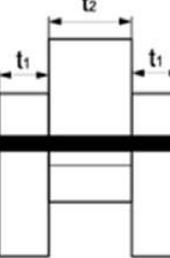
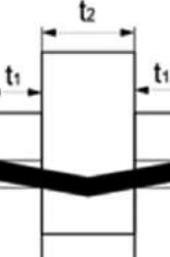
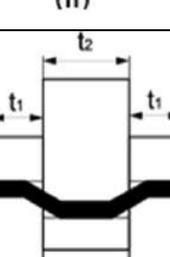


Fonte: (Do autor)

Após o ajuste da densidade aparente os corpos de provas para as ligações foram redimensionados utilizando a densidade ajustada, foi possível manter as dimensões, mas a carga de ruptura sofreu alteração (diminuiu).

No Quadro 12 são apresentados os valores de carga necessários para que as ligações atinjam a ruptura dos corpos de prova com cada um dos modos de ruptura definidos pela NBR 7190(2022).

Quadro 12 – Dimensionamento dos embutimentos nas peças e das flexões no pino

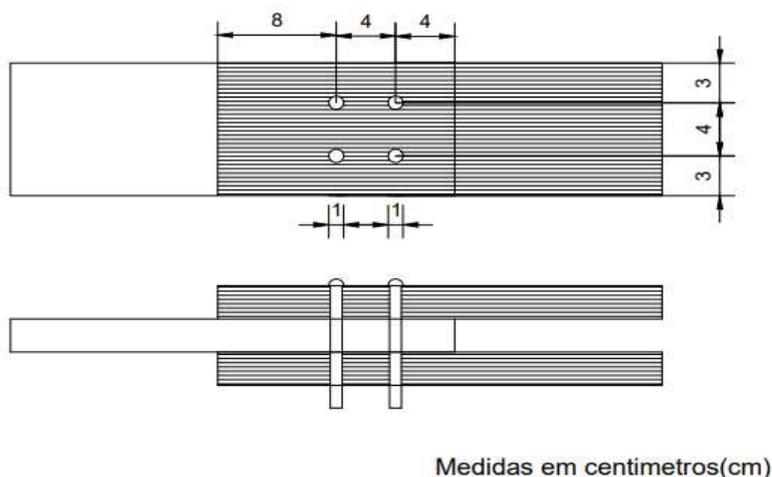
n	Modo de ruptura	Sigla	Imagem representativa	Medidas (mm)			$F_{V,RKn}$ (kN)
				t_1	t_2	d	
1	embutimento nas peças laterais	EL	 (Ia)	12,5	50,0	9,52	32,37
2	embutimento na peça central	EC	 (Ib)	25,0	25,0	9,52	32,37
3	Flexão em um ponto no pino	FS	 (II)	25,0	50,0	9,52	45,27
4	Flexão em vários pontos no pino	FM	 (III)	70,0	70,0	9,52	67,87

Fonte: (Do autor)

Os espaçamentos dos parafusos foram dimensionados conforme a NBR 7190(2022), com a mesma composição para os três tipos de ligações

parafusadas para facilitar a confecção dos corpos de prova, como mostrado na figura 11.

Figura 11 – Croqui espaçamento dos parafusos

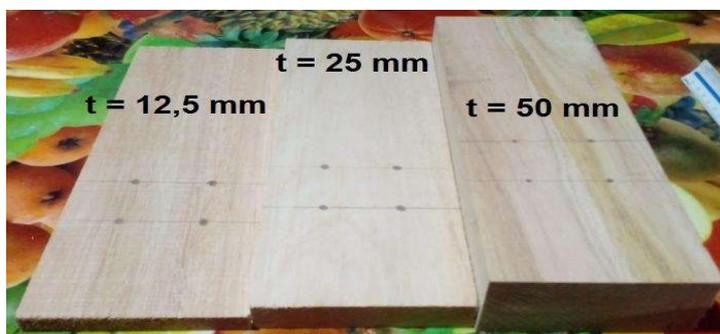


Fonte: (Do autor)

3.4 Confecção e ensaio dos corpos de prova

As madeiras *Eucalyptus alba*(Eucalipto-branco) foram adquiridas e serradas na Madeireira São José, na cidade de Alegrete/RS. Todas madeiras com o mesmo comprimento e largura, variando apenas na sua espessura das ligações em 12,5 mm, 25 mm e 50 mm como mostra a figura 12.

Figura 12 – Espessuras das chapas de madeira



Fonte: (Do autor)

Não foi possível dimensionar uma ligação para romper por Flexão em vários pontos no pino "FC", pois não foi encontrada uma chapa de madeira com a espessura necessária. Sendo assim, essa falha foi subtraída do trabalho.

Os parafusos foram adquiridos na loja Parafuso Fácil, o modelo escolhido Parafuso Francês com Porca UNC 3/8" X 4.1/2" Classe 5.8 Ferro Zincado (Trivalente), permitiu dimensionar os três tipos de falhas proposto pelo trabalho, como mostrado Figura 13.

Figura 13 - Parafuso Francês com Porca UNC 3/8" X 4.1/2" Classe 5.8 Ferro Zincado (Trivalente)



Fonte: (Do autor)

Os corpos de prova foram confeccionados nas dependências da UNIPAMPA. A NBR 7190(2022) diz que ligações parafusadas em madeiras devem ter sua pré-furação com as dimensões de diâmetro do parafuso a diâmetro do parafuso +1 mm, foram executadas com 10 mm. As três ligações com dois planos de cortes foram confeccionadas de acordo os dimensionamentos, como mostra a figura 14.

Figura 14 – Corpos de prova finalizados



Fonte: (Do autor)

Os corpos de provas foram rompidos nas dependências da UNIPAMPA nos dias 06/07/2023 e 13/06/2023 seguindo todo o roteiro que a NBR 7190/(2022) recomenda. A força foi aplicada até 0,5 da carga dimensionada e mantida constante durante 30 s. Então, a força foi reduzida até 0,1 carga dimensionada e mantida constante durante 30 s. Posteriormente, a força foi aumentada até atingir a força última ou o deslizamento de 15 mm. O tempo total do ensaio de cada corpo de prova foi ajustado para ser entre 10 min à 15 min, aproximadamente. O ensaio é encerrado quando a força aplicada variar 10% ou o deslizamento de 15 mm for atingido. Na imagem 15 um corpo de prova sendo rompido:

Figura 15 – Ensaio CP-EL-IV



Fonte: (Do autor)

4 RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

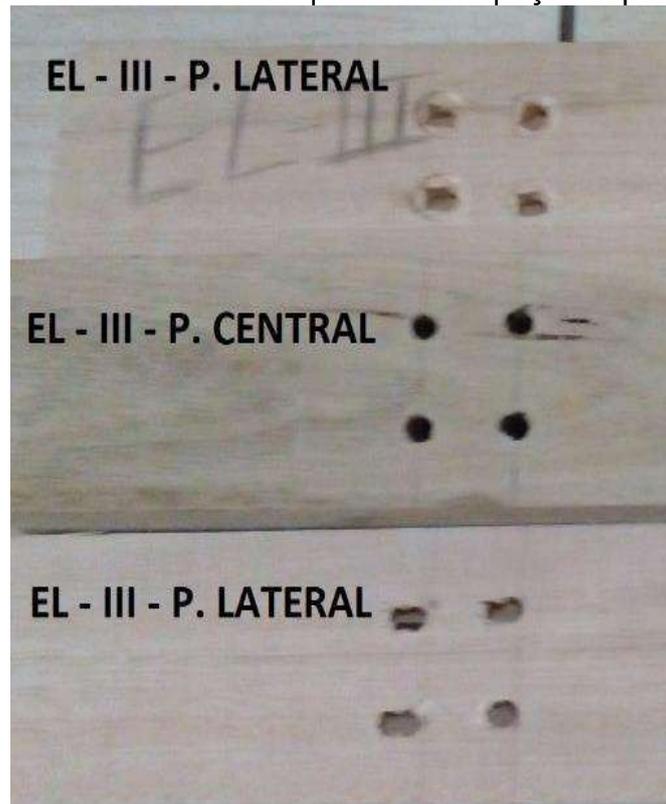
Todos os CP – EL tiveram sua ruptura por embutimento lateral como previsto no dimensionamento. As cargas de ruptura foram consideradas aceitáveis, ficando acima da carga dimensionada. Podemos observar abaixo na figura 16 os corpos de provas rompidos e na figura 17 os corpos de provas rompidos e com chapas separadas.

Figura 16 – CP – EL rompidos

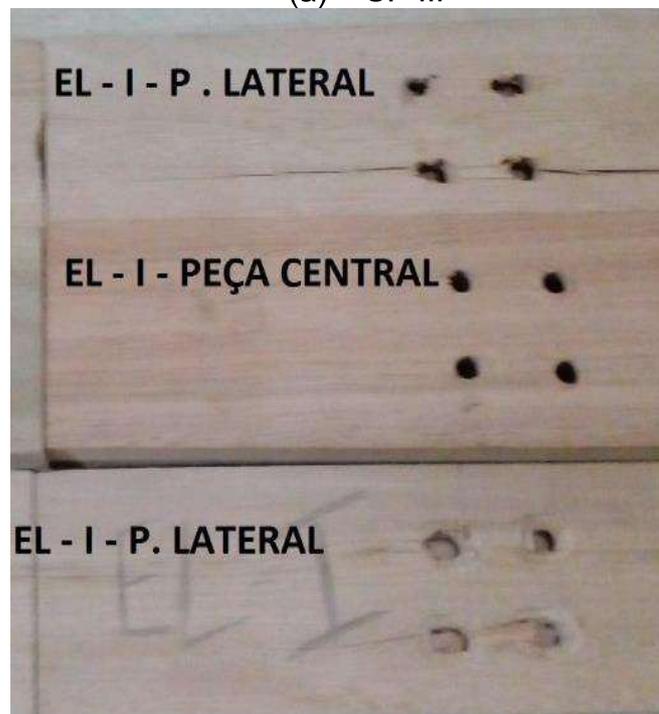


Fonte: (Do autor)

Figura 17 – CP – EL rompidos e com peças separadas



(a) – CP III

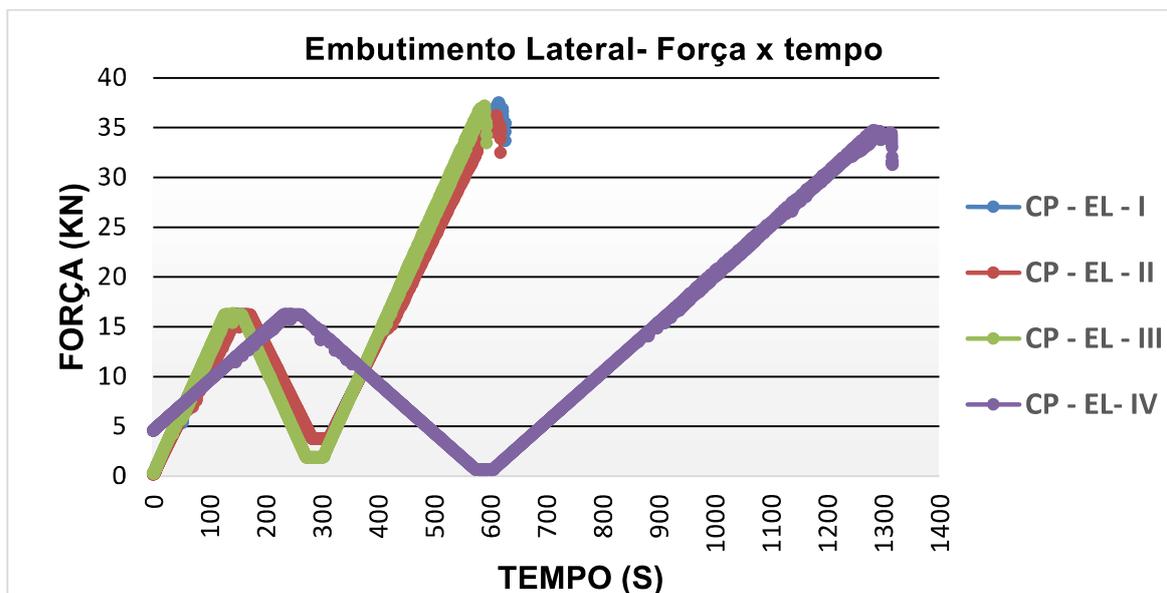


(b) – CP I

Fonte: (Do autor)

O gráfico Força x Tempo dos CP – EL tem a curva do CP - EL – IV destoando bastante dos demais em relação ao tempo, isso se deve ao ajuste da velocidade de aplicação da carga, uma vez que esse CP foi o primeiro a ser rompido. Os demais CP seguiram um padrão esperado. A figura 18 mostra essa discrepância.

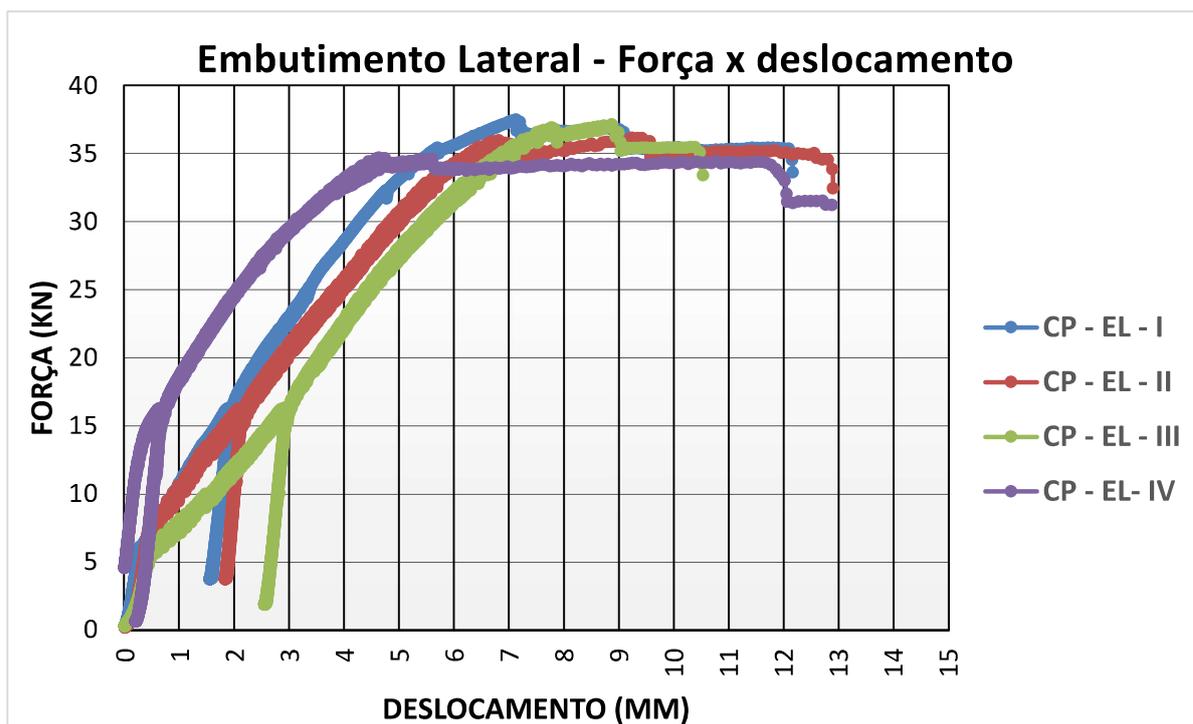
Figura 18 – Gráfico força x Tempo dos CP – EL



Fonte: (Do autor)

O gráfico Força x Deslocamento dos CP – EL continua com uma discrepância do CP – EL – IV aos demais, deslocando apenas 0,5 mm primeira parte do ensaio, enquanto os outros CP deslocaram entre 2 mm e 3 mm aproximadamente. O CP – EL – III teve um deslocamento de 3 mm na primeira parte do ensaio, em torno de 50 % a mais que os outros 2 CP, isso pode ter ocorrido ao fato do ajuste de velocidade do ensaio, que para esse CP ficou em torno de 5 segundos abaixo do mínimo aconselhado pela NBR 7190(2022), podendo ser observado na figura 19.

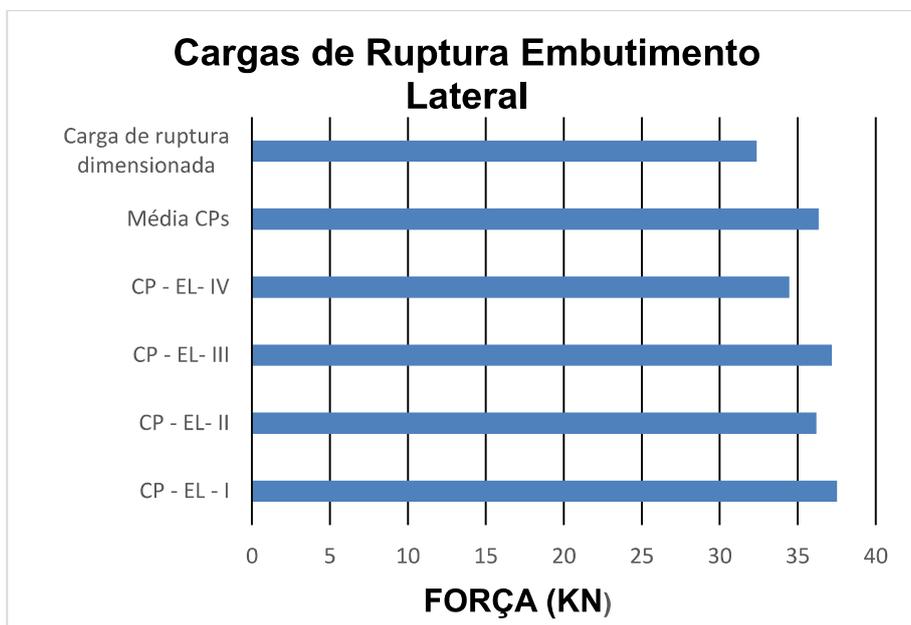
Figura 19 – Gráfico Força x Deslocamento dos CP – EL



Fonte: (Do autor)

As cargas de ruptura dos CP – EL tiveram todos os valores acima do dimensionado. O menor valor de ruptura foi no CP – EL – IV de 34,46 kN, cerca de 6,4% acima da carga dimensionada. O maior valor de ruptura foi no CP – EL – I de 37,52 kN, cerca de 14,85% acima da carga dimensionada. A média das cargas de ruptura dos CP é de 36,34 kN, 12,25% acima da carga dimensionada. O desvio padrão dos CP é de 1,18. O gráfico Cargas de Ruptura dos CP - EL é mostrado na figura 20.

Figura 20 - Cargas de Ruptura dos CP – EL



Fonte: (Do autor)

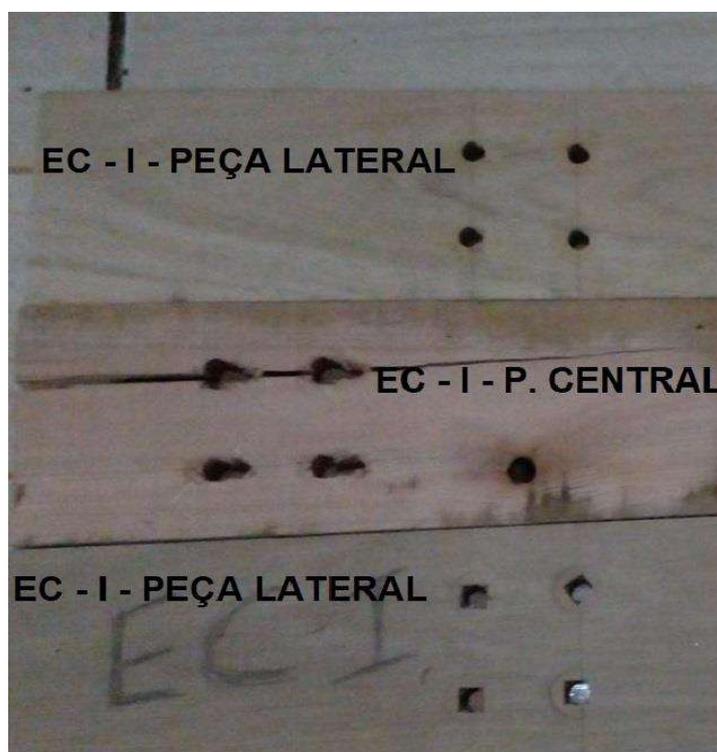
Todos os CP – EC tiveram sua ruptura por embutimento central como previsto no dimensionamento. As cargas de ruptura foram consideradas pouco aceitáveis, já que apenas um CP ficou com carga de ruptura acima da carga dimensionada. Isso pode ser explicado pela variação de resistência da madeira ser ligada a vários fatores como densidade, umidade, defeitos, etc. Outro fator preponderante pode ser algum erro de execução, como os parafusos desalinhados criando um ângulo entre a força e às fibras. Podemos observar abaixo na figura 21 os corpos de provas rompidos e na figura 22 os corpos de provas rompidos e com chapas separadas.

Figura 21 – CP – EC rompidos

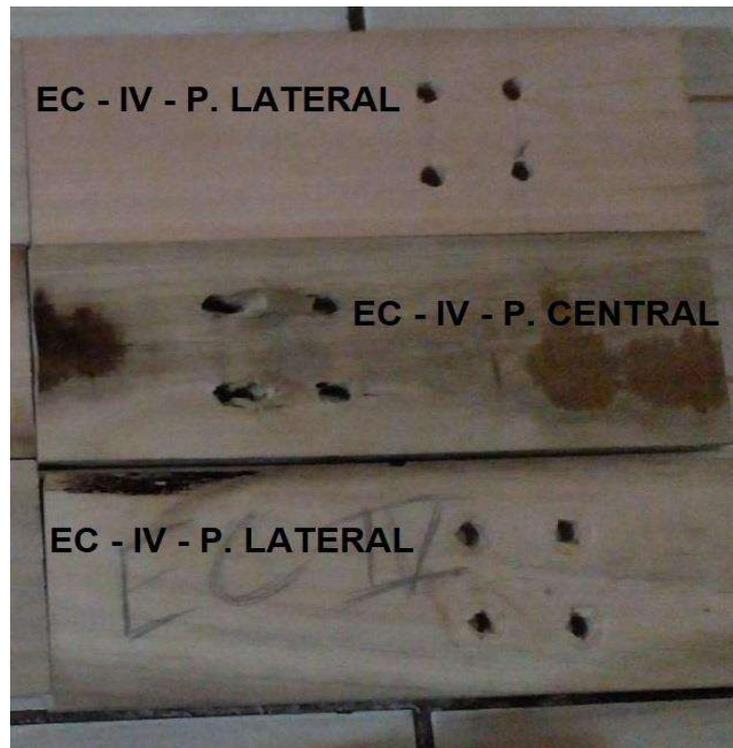


Fonte: (Do autor)

Figura 22 – CP – EC rompidos e com peças separadas



(a) – CP III

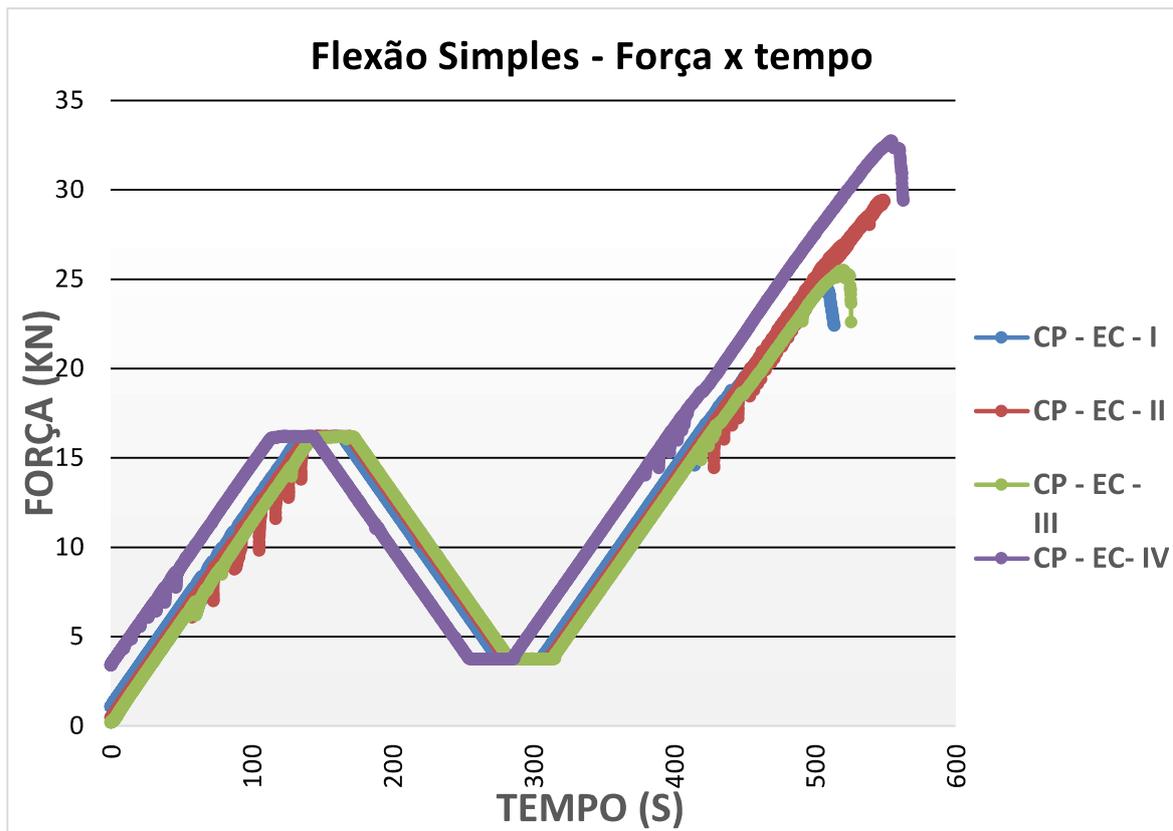


(b) – CP I

Fonte: (Do autor)

O gráfico Força x Tempo dos CP – EC tem a curva do CP - EL – IV começando com carga aplicada em torno de 3 kN devido ao ajuste manual para firmar o CP na máquina. O mesmo CP – EL – IV foi o único CP que teve carga de ruptura superior a carga dimensionada. Todos os CP tiveram tempo de ensaio abaixo do recomendável, isso pode ter interferido nos resultados, uma vez que a norma recomenda tempo de ensaio entre 10 e 15 minutos. A figura 23 mostra a curva da carga sendo aplicada em função do tempo.

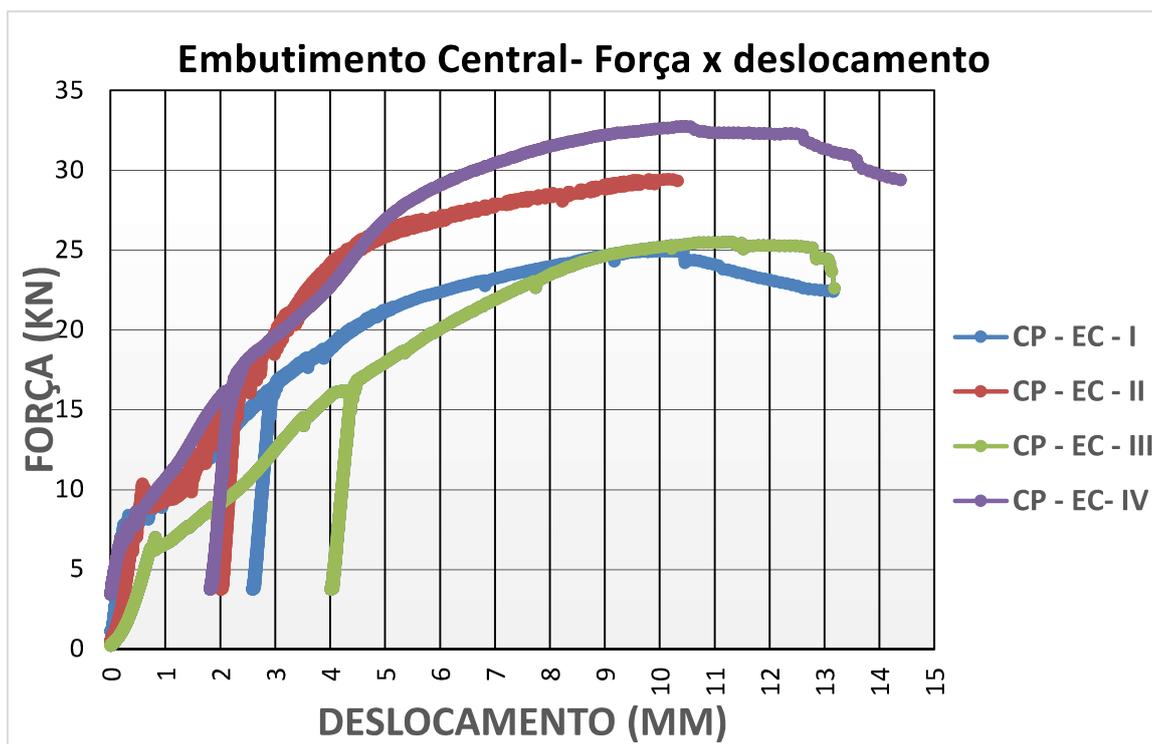
Figura 23 – Gráfico força x Tempo dos CP – EC



Fonte: (Do autor)

O gráfico Força x Deslocamento dos CP – EC nos mostra o CP – EC– III no início do ensaio apresentando um deslocamento considerável em relação aos outros CP. O CP – EC – I acaba aumentando o seu deslocamento em relação aos CP – EC – II e CP – EC - IV perto de atingir metade da carga dimensionada. Apesar do deslocamento acontecer mais cedo no CP – EL III, ainda sim ele resistiu mais que o CP – EL – I. Nenhum dos CP atingiu o deslocamento máximo de 15 mm, como mostra a figura 24.

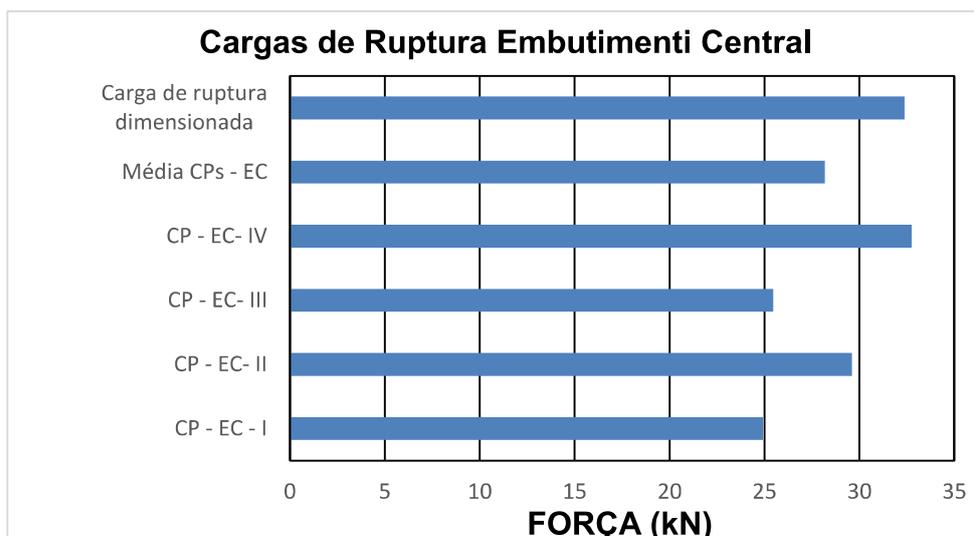
Figura 24 – Gráfico Força x Deslocamento dos CP – EC



Fonte: (Do autor)

As cargas de ruptura dos CP – EC tiveram valores abaixo da carga dimensionada, apenas o CP – EC – IV rompeu acima do carga dimensionada. O menor valor de ruptura foi no CP – EC – I de 24,91 kN, cerca de 29,91% abaixo da carga dimensionada. O maior valor de ruptura foi no CP – EC – IV de 32,74 kN, cerca de 14,85% acima da carga dimensionada. A média das cargas de ruptura dos CP é de 28,18 kN, 14,86% abaixo da carga dimensionada. O desvio padrão dos CP é de 3,19. O gráfico Cargas de Ruptura dos CP - EL é mostrado na figura 25.

Figura 25 - Cargas de Ruptura dos CP – EC



Fonte: (Do autor)

Todos os CP – FS tiveram sua ruptura por flexão simples como previsto no dimensionamento. As cargas de ruptura foram consideradas aceitáveis, porém as cargas de ruptura de todos os CP ficaram bastante acima do dimensionado. Podemos observar abaixo na figura 26 os corpos de provas rompidos e na figura 27 os corpos de provas rompidos e com chapas separadas.

Figura 26 – CP – FS rompidos



Fonte: (Do autor)

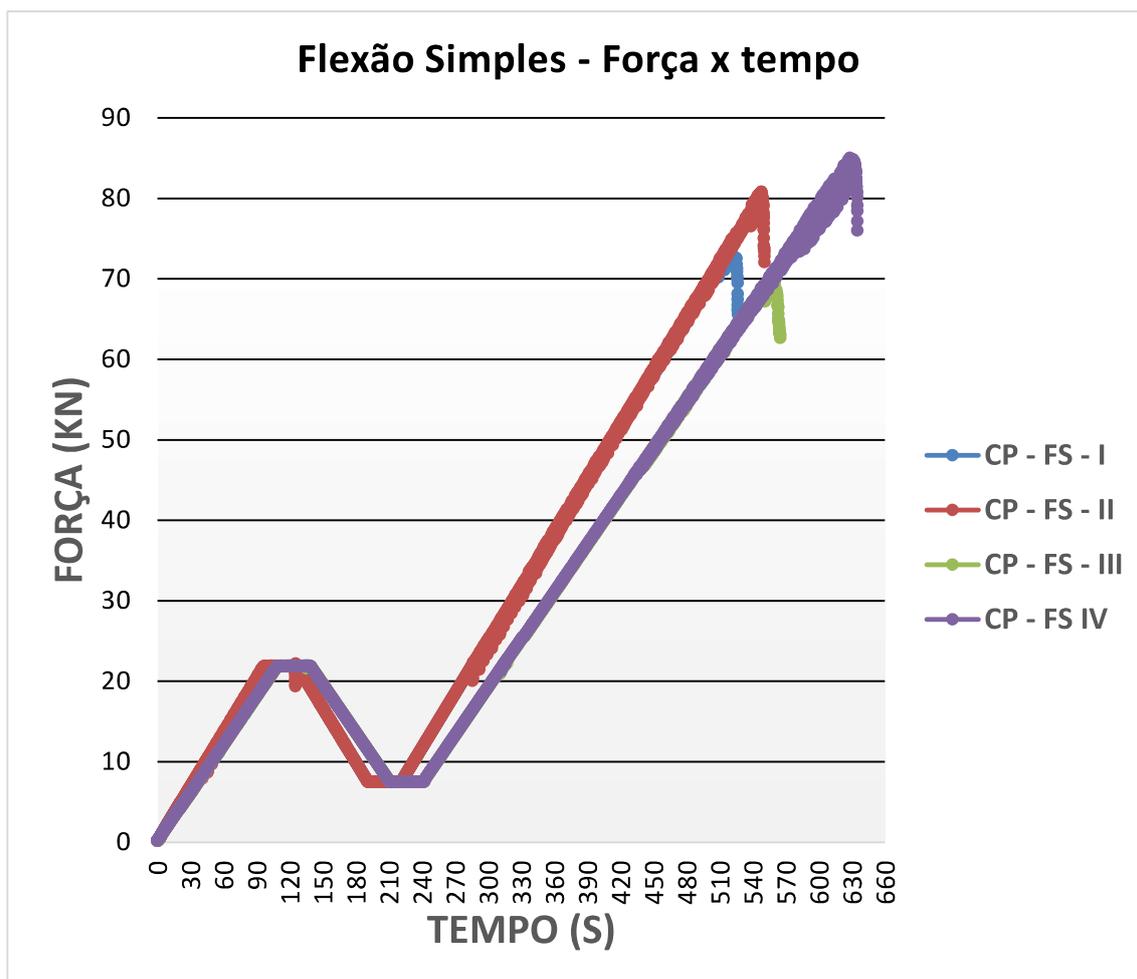
Figura 27 – CP – FS rompidos e com chapas cerradas



Fonte: (Do autor)

O gráfico Força x Tempo dos CP – FS todos o CP romperam por flexão simples e tiveram cargas de ruptura muito acima do dimensionado. Nesse dimensionamento temos um comportamento bastante similar dos quatros CP, com duas linhas no gráfico se sobrepondo a outras. Tendo altas cargas de ruptura obteve-se dificuldade em ajustar a velocidade do ensaio somente no CP – FS – IV atingindo a velocidade recomendada pela norma. A figura 28 mostra a curva da carga sendo aplicada em função do tempo.

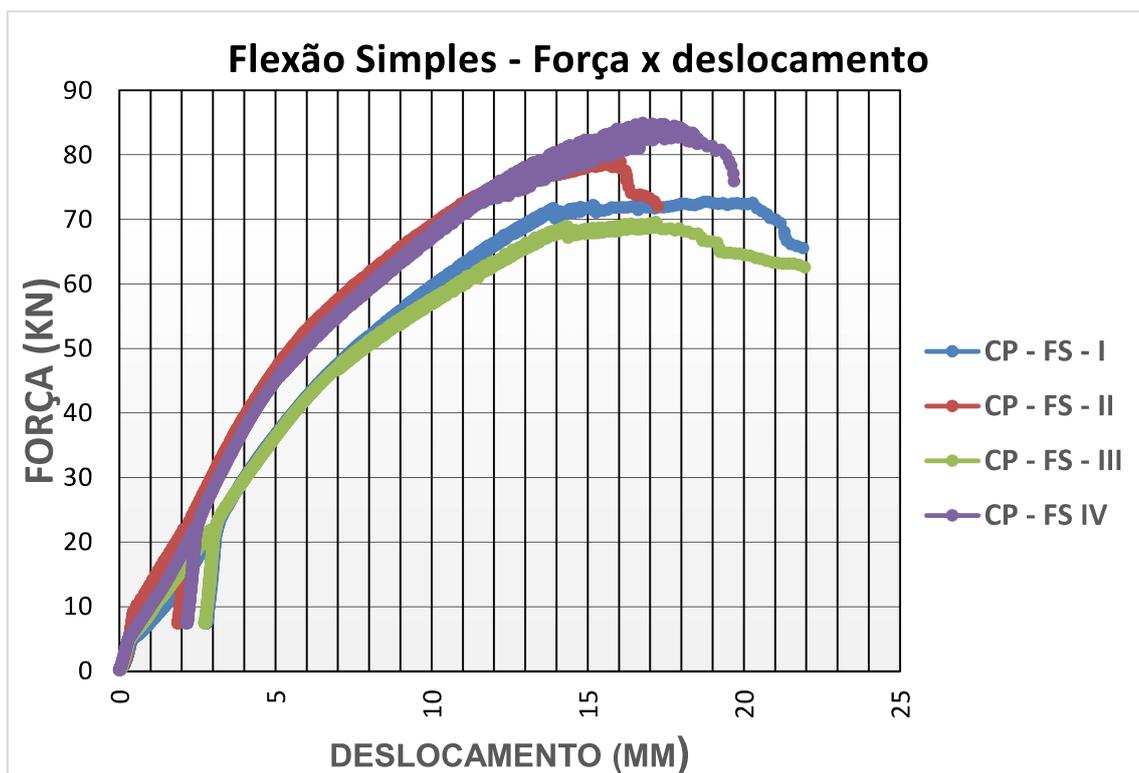
Figura 28 – Gráfico força x Tempo dos CP – FS



Fonte: (Do autor)

O gráfico Força x Deslocamento dos CP – FP nos mostra o CP – FP– I e CP – FP– III no início do ensaio apresentando um deslocamento considerável em relação aos outros CP, quando a carga atingiu 50% da carga dimensionada, a diferença de deslocamento já era de 1 mm. Há de se pontuar que todos os CP – FP ultrapassaram o deslocamento de 15mm, assim a carga de ruptura por flexão será a carga aplicada no momento que esse deslocamento foi atingido. Podemos observar esses deslocamentos em função da força na figura 29.

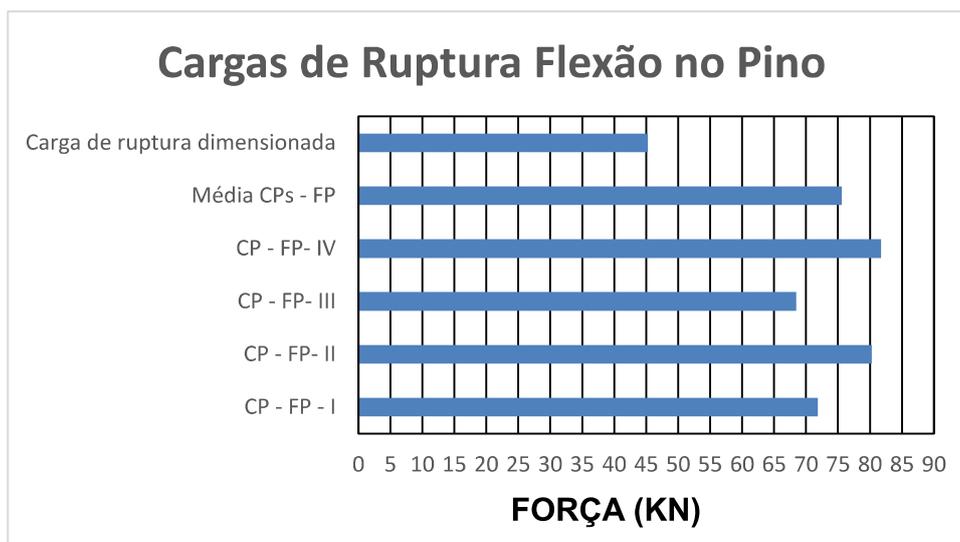
Figura 29 – Gráfico força x Tempo dos CP – FS



Fonte: (Do autor)

As cargas de ruptura dos CP – FS tiveram todas valores acima do dimensionado. O menor valor de ruptura foi no CP – FS – III de 68,49 kN, cerca de 49,86% acima da carga dimensionada. O maior valor de ruptura foi no CP – FS – IV de 81,72 kN, cerca de 78,81% acima da carga dimensionada. A média das cargas de ruptura dos CP é de 75,58 kN, 65,38% acima da carga dimensionada. Os Valores de ruptura dos CP-FS foram satisfatórios, apesar da carga de ruptura estar num patamar acima de 50% da carga dimensionada em todos CP. O desvio padrão dos CP é de 5,34. O gráfico Cargas de Ruptura dos CP - FS é mostrado na figura 30.

Figura 30 – Cargas de Ruptura dos CP – FS



Fonte: (Do autor)

O efeito de confinamento foi fator preponderante nessa suba de resistência nos CP-FS. Apesar da NBR 7190/(2022) não recomendar o uso do efeito em dimensionamentos sem investigação experimental, ela diz que o efeito do confinamento pode ser calculado entre o menor valor do embutimento das arruelas e cabeça do parafuso e a resistência a tração do parafuso. Neste trabalho, foi utilizado o parafuso francês que permite o uso de apenas uma arruela na parte inferior. Na parte superior, parte da cabeça do parafuso embuti no furo da pre-furação, não permitindo a arruela. No dimensionamento, o efeito não foi considerado, contribuindo para essa diferença de carga de ruptura. A fim de explicar essa diferença, foi feito um cálculo do efeito, mostrado no quadro 13.

$$F_{ax, RK} = (\text{Área arruela})(F_{e1, k}) + (\text{Área cabeça do parafuso})(F_{e1, k}) \quad (9)$$

Quadro 13 – Carga de ruptura com estimativa com o efeito de confinamento

Carga de ruptura dimensionada (kN)	Efeito de confinamento (kN)	Carga total estimada (kN)
45,27	10,55	55,82

Fonte: (Do autor)

Para ilustrar o efeito de confinamento, a figura 31 mostra o embutimento causado pelas arruelas e a figura 32 mostra o embutimento da cabeça do parafuso na madeira.

Figura 31 - embutimento causado pelas arruelas



Fonte: (Do autor)

Figura 32 - embutimento causado pela cabeça do parafuso



Fonte: (Do autor)

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo verificar ligações parafusadas em madeiras com dois planos de cortes, submetidas a compressão paralela às fibras, segundo os critérios da NBR 7190/(2022). O objetivo principal foi verificar e comparar valores entre o dimensionamento de ligações parafusadas e o ensaio de rupturas dessas ligações, ambos parâmetros de acordo com a norma técnica.

Verificou-se que a NBR 7190:(2022) atende ao seus critérios, uma vez que todos os CP romperam com o tipo de falha que o dimensionamento apontou. Porém, apenas os CP-EC obtiveram três dentre os quatro CP rompendo com carga de ruptura abaixo da carga dimensionada.

No caso dos CP-EL, o resultado foi bastante satisfatório com todos o CP rompendo 12,26% acima da carga dimensionada. Os CP-EC tiveram apenas um CP rompendo apenas 1,14% acima da carga dimensionada, os outros três CP romperam na média 12,95% abaixo da carga dimensionada. Isso pode ser explicado pela própria resistência da madeira ter muitas variações, alguns erros de execução como as chapas de madeiras não estarem bem alinhadas devido a pré-furação, um fator preponderante foi não considerar os defeitos na madeira antes do dimensionamento, isso teria um decréscimo considerável na densidade aparente. Os CP-FS tiveram um resultado aceitável, apesar da média de ruptura dos CP-FS de 66,95% acima da carga dimensionada. Essa carga bem acima se explica pela própria resistência característica do parafuso e do efeito do confinamento que não foi considerado.

Assim, baseado nos resultados deste trabalho pode-se concluir que a NBR 7190(2022) justifica a segurança estrutural das ligações parafusadas, garantindo a conformidade entre os cálculos do dimensionamento segundo a norma e os ensaios de rupturas, uma vez que apenas que os poucos CP que ficaram com valores abaixo do dimensionados tem justificativa de acordo com a própria NBR 7190(2022).

5.1 ESTUDOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se:

- Estudos de caracterização da madeira com a influência da umidade e dos defeitos do material.
- Influência do efeito de confinamento na flexão dos parafusos em ligações parafusadas e ligações pregadas.
- Influência das arruelas nos ensaios de tração ou compressão em ligações parafusadas na falha de flexão do pino.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUALI, Nizar Alawi. 2019. **Verificação da segurança em ligações de madeira com pinos metálicos do tipo prego conforme NBR 7190/1997**. UNIPAMPA. Alegrete, RS. 2019.

ANDRIONI, Camila Natália. 2019. **Estudo da caracterização física e mecânica da madeira pinus elliottii**. UNIPAMPA. Alegrete, RS. 2019.

CALIL JUNIOR, C. SET 406 - **Estruturas de Madeira - Notas de aula**. Escola de Engenharia de São Carlos, Publicações EESC/USP, São Carlos, 1999.

CORREIA, Emanuel André Soares. Análise e Dimensionamento De Estruturas de madeira. 2009. **Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em engenharia civil**. Universidade do Porto, Portugal.

CORDEIRO JÚNIOR, Carlos Roberto; SILVA, Wendna Cristina Rocha; SOARES, Paulo de Tarso Machado Leite. 2017. **Uso da madeira na construção civil**. Rio de Janeiro, RJ.

Disponível em: <<https://revistas.unisuam.edu.br/index.php/projectus/article>>
Acesso em: 25. Mai. 2022.

GESUALDO, Francisco A. Romero. **Estruturas de madeira**. Uberlândia, MG. mai. 2003.

Disponível em: <http://usuarios.upf.br/~zacarias/Notas_de_Aula_Madeiras.pdf> .
Acesso em: 05 jun. 2022.

KOLLMANN, F, F, P.; COTÉ, W, A. **Principes of wood Science and technology. vol. I Solid Wood**. Reprint. Berlin, Helderberg, New York, Tokyo. 1968 – 1984.

MANRIQUEZ FIGUEROA, Manuel de Jesús. **Coeficientes de modificação das propriedades mecânicas da madeira à temperatura**. Florianópolis: Ed. UFSC, 2012. 259 p. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

NUMAZAWA, C. T. D. Arquitetura japonesa no Pará: **estudo de caso em edificações com técnica construtiva que favoreceu uma maior durabilidade da arquitetura em madeira no município de Tomé-açu**. 2009. 117f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2009.

OLIVEIRA, Marco Antonio Melo. **Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira**. 2001. Dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia de estruturas. Universidade de São Paulo.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de madeira**. 2003. Rio de Janeiro: Livros.

SANTOS, Lara Monalisa Alves. **Madeiras**. Não datado. Brasília. UNB – Universidade de Brasília.

TOMAZ, Daniel Ferreira. 2015. **Fenômenos de segunda ordem em ligações parafusadas em madeira**. UTFPR – UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ.

ZENID, José Geraldo. Madeira na construção civil., 2011. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo**.

