



2023

## Resistência de ligações pregadas de peças de madeira Peroba do Norte

Marcos Antonio M. Silva <sup>a</sup>; Trindade, C. A. <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Aluno de Graduação em Engenharia Civil, [antonio.moreira@ufms.br](mailto:antonio.moreira@ufms.br)

<sup>b</sup> Professor Orientador, Doutora, [christiane.trindade@ufms.br](mailto:christiane.trindade@ufms.br)

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

### RESUMO

Para dimensionar elementos de ligação para estruturas de madeira, é preciso determinar a resistência da mesma, que depende, além das características geométricas da ligação, de dois parâmetros: a resistência ao embutimento da madeira e a resistência à flexão do pino, no caso o prego. Este trabalho tem por objetivo apresentar o estudo teórico e experimental da rigidez e resistência das ligações em estruturas de madeiras, por meio de pregos, com intuito de avaliar o valor de cálculo previsto pela NBR 7190 (ABNT, 2022), em relação aos valores reais obtidos em laboratório. Os ensaios foram realizados com a madeira Peroba do Norte e pinos metálicos de 7,6 mm de diâmetro. Além dos ensaios nas ligações, foram realizados ensaios de embutimento paralelo às fibras na mesma madeira de modo a permitir o cálculo mais fidedigno da resistência prevista das ligações. Os resultados dos ensaios mostraram que as resistências médias entre os modelos experimental e teórico apresentaram no final pouca variação, e o comportamento real das ligações foi condizente com o modelo de falha previsto pela norma, no entanto a rigidez encontrada mostra que os cálculos da norma superestimam os resultados de módulo de rigidez obtidos experimentalmente, o que pode implicar em deformações diferentes do que se é esperado em ligações pregadas de madeira.

**Palavras-chave:** Ligações em madeira, pinos metálicos, embutimento, resistência, Peroba do norte.

### ABSTRACT

In order to dimension connection elements for wooden structures, it is necessary to determine its strength, which depends, in addition to the geometric characteristics of the connection, on two parameters: the embedding strength of the wood and the dowel bending strength, in this case the nail. This work aims to present a theoretical and experimental study about the stiffness and strength of dowel type connections in wooden structures, so that the calculation value predicted by NBR 7190 (ABNT, 2022) can be evaluated in comparison to the real values obtained in the laboratory. The tests were carried out with Peroba do Norte specie and nails of 7.6 mm in diameter. In addition to the tests on the connections, embedding tests were carried out parallel to the fibers in the same wood in order to allow a more reliable calculation of the expected strength of the connections. The results of the tests showed that the average strengths of experimental and theoretical models showed little variation among them, and the real behavior of the connections were consistent with the failure mode predicted by the standard, however the experimental value of stiffness shows that the calculations by the standard overestimate the stiffness modulus, which may imply that deformations will be different from what is expected in nailed wooden connections.

**Keywords:** Wood connections, dowel, embedding, strength, Peroba do norte.

## 1. INTRODUÇÃO

A madeira está presente na construção civil desde as primeiras construções do homem e até hoje existente nas mais diversas obras. Por ser um material disponível como natural ou reflorestado, o seu uso vem se diversificando cada vez mais de forma a ser o elemento principal de sustentação, como no *Wood frame*, onde as peças de madeira formam todo elemento edificado, o que leva à importância de se fazer um bom projeto estrutural de madeira. Assim torna-se fundamental avaliar as melhores formas possíveis de realizar as ligações entre as peças e fazer a melhor escolha da espécie de madeira para isso.

A NBR 7190 (ABNT, 2022) apresenta os pinos metálicos mais usuais como parafusos com porcas e arruelas, parafusos com rosca soberba e os pregos, que são o foco principal deste trabalho, as ligações pregadas podem ser em corte simples ou duplo, e devem ser obrigatoriamente feitas com pré-furação da madeira para que não se danifique a peça no ato de inserção dos pregos. Além disso, é exigido um comprimento mínimo de penetração do prego para que ele seja considerado resistente.

Nas ligações por pinos, o contato entre pino e madeira é o ponto onde ocorre o maior acúmulo de tensões e esforços, e a madeira, assim como o pino, precisa ter resistência compatível para que não ocorra a falha na estrutura. De acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022), um dos requisitos para o projeto estrutural é a apresentação de detalhamentos e dimensionamentos de emendas, uniões e ligações.

O dimensionamento das ligações é feito considerando os diversos modos de falha que podem ocorrer variando desde o modo onde ocorre somente o embutimento do pino na madeira, até o modo onde há flexão do pino.

Moreira (2004) afirma que as áreas de contato nas ligações pinadas são discretas, e a região de contato entre pino e peça se tornam regiões de concentração de tensões para transmissão de esforços. Caso a ruptura aconteça no pino, a capacidade de carga será influenciada pelo seu escoamento, e o processo tende a ser dúctil. Assim, a resistência da ligação será definida em função de um limite de deformação.

### 1.1. Objetivo

Este trabalho tem por objetivo apresentar o estudo teórico e experimental da rigidez e resistência das ligações em estruturas de madeiras, por meio de pregos, com intuito de comparar o valor de cálculo previsto pela NBR 7190 (ABNT, 2022) com os resultados obtidos em laboratório.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

A NBR 7190 (ABNT, 2022) não nos traz mais os cálculos da resistência considerando apenas dois modos de falha como na sua versão anterior, de 1997, que muitas vezes foi vista como conservadora ao restringir o modo de ruptura em embutimento do pino na madeira ou flexão do pino metálico. Contudo, a nova normativa introduz cálculos que preveem uma associação desses efeitos, contribuindo para uma melhor aproximação com o comportamento real da ligação na hora de projetar.

Segundo Pfeil (2003), as ligações já foram dimensionadas com base em fórmulas empíricas anteriormente, entretanto com a grande variedade de espessuras e diâmetros de pinos possíveis, as fórmulas empíricas não são mais consideradas confiáveis, uma vez que os trabalhos teóricos desenvolvidos na teoria de análise limite por Johansen em 1949 foram confirmados por ensaios experimentais de Step em 1996, resultando em expressões para carga última de ligações que admitem um comportamento rígido-plástico dos materiais. Os quais serviram de base para os cálculos pertencentes à normativa brasileira a partir de 2022, e são apresentadas no decorrer desse trabalho.

Em seu trabalho Johansen (1949) consegue analisar os diferentes comportamentos em ligações com pinos metálicos e assim descrever os modos de falha com os seus testes, e com isso formulou as primeiras expressões para obtenção da resistência e rigidez. De acordo com Maia (2017) essa teoria deu início aos principais estudos que embasam a norma europeia Eurocode 5 (CEN, 2004) onde é aplicada a teoria da análise limite, como veremos na atualização da norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022),

## 2.1 Embutimento

O embutimento do pino na madeira ocorre na área de contato entre os dois, devido aos esforços provocados pelo carregamento da estrutura na ligação.

A NBR 7190 (ABNT, 2022) disponibiliza equações para cálculo estimado dos valores de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras, no caso da ausência de ensaios em laboratório, por meio das Equações 1 e 2.

Sem pré-furação

$$f_{e,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3} \text{ [em N/mm}^2\text{]} \quad (1)$$

Com pré-furação

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

Onde:  $d$  é o diâmetro do pino em mm,

$\rho_k$  é a densidade característica da madeira em  $\text{kg/m}^3$ .

Para sua determinação é necessário conhecer o valor da densidade característica da madeira ( $\rho_k$ ), que pode ser escrita a partir da densidade média ( $\rho_m$ ), dada na Equação 3.

$$\rho_k = \frac{\rho_{méd}}{1,2} \quad (3)$$

A resistência ao embutimento a partir de ensaios é dada pela Equação 4.

$$f_{e0} = \frac{F_{e0}}{t \cdot d} \quad (4)$$

Onde:

$F_{e0}$  é a força aplicada máxima ou a força para um deslocamento de 5 mm [N];

$t$  é a espessura do corpo de prova, em milímetros [mm];

$d$  é o diâmetro do prego [mm];

$t \cdot d = A_e$ : é a área de embutimento do pino.

## 2.2 Ligações com pino metálico

Para o cálculo da resistência característica de uma ligação pela NBR 7190 (ABNT, 2022) utiliza-se a Equação 5 definida como  $R_k$ , sendo a resistência geral do elemento que engloba cada resistência de cada pino existente nas seções de corte:

$$R_k = F_{v,Rk} \cdot n_{sp} \cdot n_{ef} \quad (5)$$

Onde:

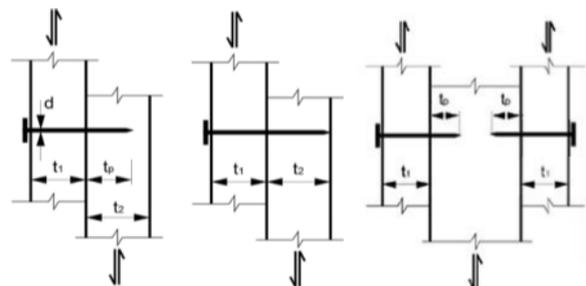
$n_{sp}$  : é a quantidade de seções de corte,

$n_{ef}$  : é o número de pinos por ligação,

$F_{v,Rk}$  : é a resistência de um pino, correspondente a uma seção de corte.

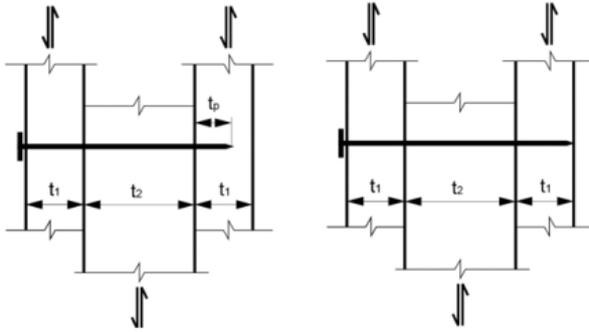
Para o cálculo da resistência de um pino ( $F_{v,Rk}$ ), utiliza-se o menor valor entre os modos de falha possíveis segundo a NBR 7190 (ABNT, 2022), a depender da quantidade de seções de corte. Em seções em corte simples a medida  $t_1$  é a espessura da primeira peça de madeira e  $t_p$  será a profundidade de penetração do pino na segunda peça, que para os pregos tem uma distância mínima de  $12d$  ou a espessura total dessa peça, caso o mesmo atravessasse toda a segunda peça  $t_p = t_2$ . Em seções de corte duplo  $t_2$  é a espessura da peça central e  $t_p$  será a profundidade de penetração no elemento pregado mais distante, conforme as Figuras 1 e 2.

Figura 1: Ligações em peças de madeira com pregos em corte simples.



Fonte: Adaptado de NBR 7190-1 (ABNT, 2022).

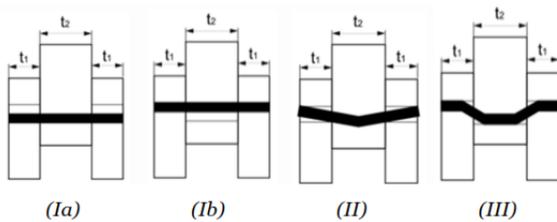
Figura 2: Ligações em peças de madeira com pregos em corte duplo.



Fonte: Adaptado de NBR 7190-1 (ABNT, 2022).

De acordo com as expressões propostas pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022), o cálculo para resistência leva em consideração situações possíveis que possam provocar a falha, e que pode depender da resistência ao embutimento da madeira, das espessuras das peças, do momento resistente do pino metálico e também de seu diâmetro. Quando esses fenômenos se associam, tem-se os modos de falha apresentados na Figura 3. Os modos Ia e Ib são caracterizados pelo embutimento na madeira, o modo II é caracterizado pelo embutimento na madeira associado à rotação do pino com formação de uma rótula plástica, e o modo III é caracterizado pela predominância de flexão no pino com formação de três rótulas plásticas. Os valores da resistência para cada modo de falha podem ser calculados com as expressões 6 a 9 respectivamente.

Figura 3: Modos de falha característicos em corte duplo.



Fonte: Adaptado de NBR 7190-1 (ABNT, 2022).

As equações que descrevem os modos de falha são:

$$(Ia) \quad F_{v,Rk1} = f_{e1,k} t_1 d \quad (6)$$

$$(Ib) \quad F_{v,Rk2} = 0,5 f_{e1,k} t_2 d \beta \quad (7)$$

(II)

$$F_{v,Rk3} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[ \sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta) M_{y,k}}{f_{e1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (8)$$

$$(III) \quad F_{v,Rk4} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2 M_{y,k} f_{e1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (9)$$

O coeficiente  $\beta$  é a razão entre as resistências ao embutimento dos elementos de madeira pregados, dado pela expressão 10:

$$\beta = \frac{f_{e2,k}}{f_{e1,k}} \quad (10)$$

sendo que no caso dos ensaios realizados neste trabalho será considerado como 1, ou seja  $\beta = 1$ , pois foi utilizada a mesma espécie em todos os elementos do corpo de prova.

$M_{y,k}$ : é momento resistente característico do pino metálico que pode ser calculado pela Equação 11, e o fator  $f_{u,k}$  é a resistência última do aço.

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

O fator  $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$ , é uma contribuição de resistência provocado pela cabeça do prego, pode ocorrer quando houver resistência de arrancamento ou embutimento da cabeça, porém é necessário que haja comprovação deste efeito experimentalmente para ser considerada.

### 2.3 Rigidez das ligações

A rigidez axial das ligações pode ser determinada a partir dos ensaios ligações da NBR 7190-5 (ABNT, 2022), ou por formulações teóricas pelas Equações 12 e 13 que levam em consideração a densidade e o diâmetro do prego na ligação para estimar a rigidez que é apresentada como  $k_{ser}$  em [N/mm] ou rigidez de serviço.

Com Pré-furação:

$$k_{ser} = \rho_{méd}^{1,5} \cdot \frac{d}{23} \quad (12)$$

Sem Pré-furação:

$$k_{ser} = \rho_{méd}^{1,5} \cdot \frac{d^{0,8}}{30} \quad (13)$$

### 3. METODOLOGIA

Para se definir a resistência da ligação pregada, além dos ensaios de ligação propriamente ditos, também foram realizados ensaios de embutimento na direção paralela às fibras para obter uma previsão dos resultados dos experimentos de ligações. O método utilizado vai ser uma comparação dos valores teóricos calculados segundo a NBR 7190 (ABNT, 2022), com os resultados dos ensaios de laboratório e também mostrar qual a correlação entre o embutimento da madeira e resultado do ensaio de ligações pregadas.

#### 3.1. Materiais

Para realização desta pesquisa foi utilizada a madeira de uma espécie de dicotiledônea nativa, a Cupiúba, conhecida como Peroba do Norte (*Goupia Glabra*), podendo ser considerado um lote homogêneo pois foram retiradas peças da mesma viga de madeira.

Para os ensaios foram confeccionadas as peças com dimensões padronizadas pela NBR 7190 (ABNT, 2022), sendo 4 corpos de prova para cada ensaio: o primeiro de embutimento e o segundo de ligações com duas seções de corte, ambos realizados com a força aplicada na direção paralela as fibras.

Os pinos metálicos utilizados foram pregos (26x72) com diâmetro de 7,6mm da ArcelorMittal de aço com resistência última de 600 MPa. Para cravação dos pregos, primeiramente foi feita a pré-furação da madeira, com pré-furo de 0,98 d utilizando uma furadeira com broca de diâmetro de 7,0mm, para não ocorrer fendilhamento ou rachaduras nos corpos de prova, conforme mostrado na Figura 4.

A sequência lógica dos ensaios ocorreu de forma que a força máxima encontrada para o ensaio de embutimento fosse utilizada posteriormente para o carregamento do próximo ensaio de ligações, pois foram utilizadas as madeiras da mesma fonte, assim como os mesmos pregos.

Figura 4: Alinhamento e pré-furo das peças.



Fonte: Autor (2023).

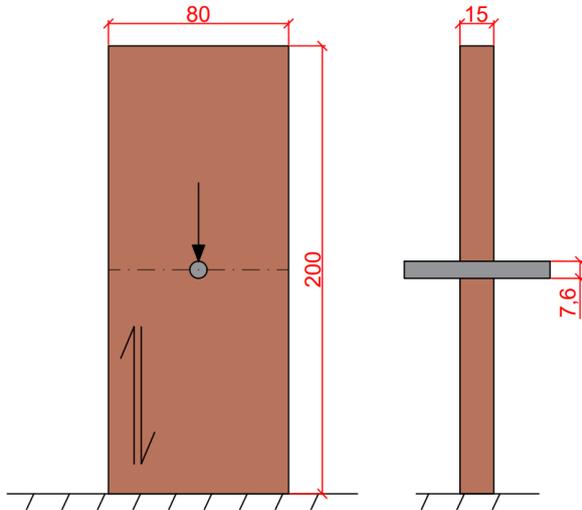
Para todos os ensaios utilizou-se a máquina universal de ensaios mecânicos que tem capacidade de 300 kN, assim como dois relógios comparadores capaz de medir o deslizamento com precisão de 0,01 mm.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de materiais de construção civil (LMCC) da UFMS.

#### 3.2. Ensaio de Embutimento

O ensaio de embutimento na madeira segundo a NBR 7190 (ABNT, 2022), considera a resistência ao embutimento ( $f_e$ ) como a razão entre a força ( $F_e$ ) e a área de embutimento do pino. A forma da peça para esse ensaio na direção paralela às fibras deve ser prismática com espessura mínima duas vezes o diâmetro do pino, seguindo os requisitos da norma vigente em 2022. Nas Figuras 5 e 6 estão apresentadas a forma e dimensões do corpo de prova para o prego de 7,6 mm.

Figura 5: Dimensões do corpo de prova em mm para o ensaio de embutimento na direção paralela às fibras.



Fonte: Autor (2023).

As dimensões dos corpos de prova para ensaio de embutimento de acordo com a norma de 2022, foram medidas com auxílio de um paquímetro, as quais podem ser encontradas na Tabela 5 no Apêndice A.

Figura 6: Corpo de prova de madeira preparado com pré-furo de acordo com NBR 7190/2022 e pino metálico de 7,6 mm.



Fonte: Autor (2023).

Na máquina universal, a força foi aplicada no corpo de prova gradualmente com velocidade de 0,008 mm/s até que acontecesse o rompimento com força máxima, ou que o deslocamento relativo entre pino e madeira atingisse 5 mm. A força inicial ( $f_{e,est}$ ) foi estimada e confirmada com o primeiro corpo de prova.

A figura 7, apresenta o corpo de prova já instalado na máquina de ensaio, com relógios comparadores para leitura dos deslocamentos relativos.

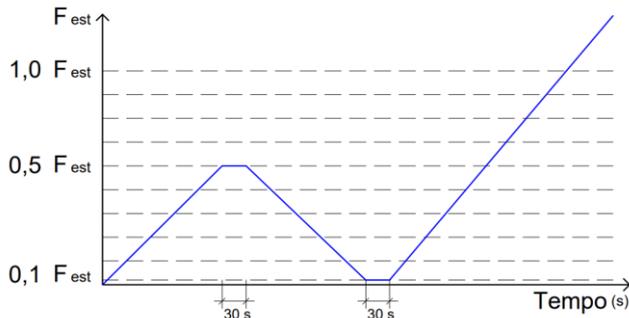
Figura 7: Montagem do esquema para medir deslocamentos na máquina universal com relógios comparadores.



Fonte: Autor (2023).

Para o ciclo de carregamentos foi seguido o esquema de aplicação de forças conforme o diagrama apresentado pela NBR 7190 (ABNT, 2022), simplificado na Figura 8, que faz no experimento a aplicação de 1 ciclo de carga e descarga e depois aumenta-se a carga sucessivamente até atingir a força máxima.

Figura 8: Diagrama para procedimento de carga.



Fonte: Autor (2023).

Durante os ensaios a cada incremento de carga, foram medidos tanto a força, quanto o deslocamento do pino, para confecção de gráficos de força x deslocamentos, que estão disponíveis no Apêndice B.

A Figura 9, apresenta os corpos de prova após o ensaio, nos quais pode-se observar a ovalização do furo.

Figura 9: Corpos de prova após ensaios.

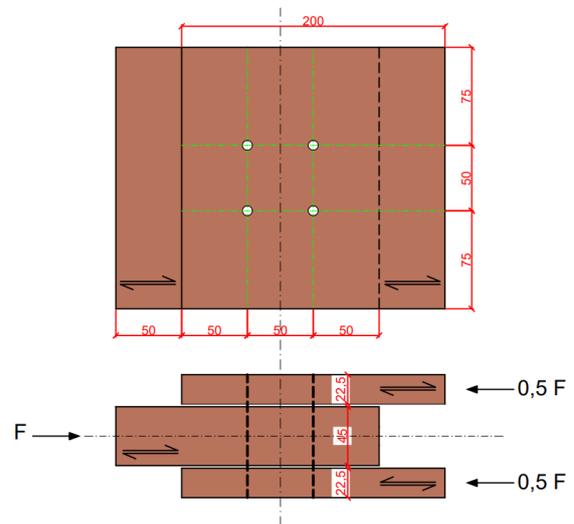


Fonte: Autor (2023).

### 3.3 Ensaio de Ligações com pino metálico

Para o ensaio de ligações em madeira, as peças utilizadas possuem dimensões comerciais bastante utilizadas em serviço devido a uma padronização do tamanho para vigas encontrado no mercado de Campo Grande, MS. Como recomendado na Norma 7190-5 (ABNT, 2022), o arranjo para ligação com pinos é formado por uma peça central e duas laterais como mostra o esquema da Figura 10, e para coerência nos ensaios foi utilizado nas peças laterais de ligação a mesma madeira da peça central. As dimensões e espessuras das peças ensaiadas estão disponíveis no Apêndice A.

Figura 10: Dimensões de projeto do corpo de prova em (mm) para o ensaio de resistência da ligação na direção paralela as fibras.



Fonte: Autor (2023).

Figura 11: Corpo de prova de madeira preparado com pré-furo de acordo com NBR 7190-5/2022 e pinos metálicos de 7,6 mm.



Fonte: Autor (2023).

A aplicação do carregamento seguiu o mesmo esquema mostrado na Figura 5, com a peça centralizada na mesa da máquina universal. Com relógios comparadores mediu-se os deslocamentos dos dois lados, instalados com auxílio de cantoneiras nas laterais do corpo de prova, conforme a Figura 12.

Figura 12: Montagem do corpo de prova na máquina de ensaios.



Fonte: Autor (2023).

Após a coleta dos dados, foi possível expressar em gráficos de força x deslocamento, o comportamento dos CP's durante os ensaios no laboratório.

### 3.4 Rigidez Axial

A rigidez axial é obtida com a Equação 14 utilizando os resultados do ensaio:

$$K_s = 0,5 \frac{F_{est}}{u_{i,mod}} \quad (14)$$

Para o cálculo de  $K_s$ , é necessário possuir o valor do deslocamento inicial modificado ( $u_{i,mod}$ ), o qual é obtido a partir do gráfico de força x deslocamento proveniente do ensaio e calculado pela equação 15. O  $K_s$  obtido representa uma ligação completa, então para fins de comparação com o  $k_{ser}$  é necessário dividir o resultado pelo número de pinos multiplicado pela quantidade de seções de corte.

$$u_{i,mod} = \frac{5}{4} (u_{05} - u_{01}) \quad (15)$$

Onde:

$u_{05}$  é o deslocamento em 50% da força estimada.

$u_{01}$  é o deslocamento em 10% da força estimada.

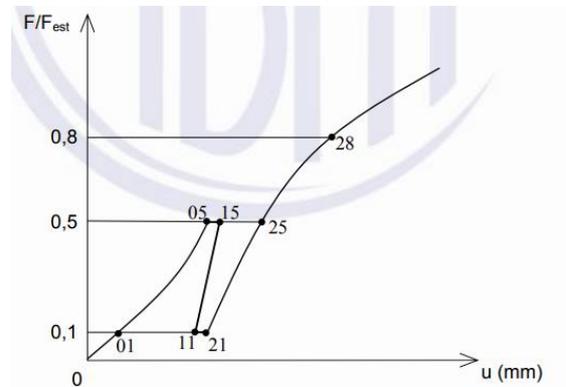
A NBR 7190-5 (ABNT, 2022) também nos apresenta o cálculo do deslocamento elástico pela Equação 16, que foi usado para comparar resultados de rigidez com  $k_{ser}$ .

$$U_e = \frac{5}{8} (u_{15} + u_{25} - u_{11} - u_{21}) \quad (16)$$

Onde:

$u_{15}$ ,  $u_{25}$ ,  $u_{11}$  e  $u_{21}$  são medidas de deslocamentos obtidas do gráfico conforme a Figura 13:

Figura 13 – Diagrama de força versus deslocamento da ligação.



Fonte: NBR 7190-5 (ABNT, 2022).

Para dar sequência aos cálculos de rigidez utilizou-se da Equação 17 para determinação experimental da densidade média seca ( $\rho_{méd}$ ) para a madeira Peroba do Norte.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (17)$$

Onde:

$M$  é a massa em [kg];

$V$  é o volume em [m<sup>3</sup>];

Na determinação dessa propriedade foram utilizados 3 CP's provenientes do ensaio de embutimento para as medidas de massa e volume e assim encontrar uma densidade média.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analisando os dados coletados dos ensaios no laboratório, foram obtidos resultados para as forças máximas e resistências e para melhor apresentação, foram confeccionados tabelas e gráficos para cada tipo de ensaio. Para melhor avaliação apresenta-se o valor médio, também o desvio padrão, o coeficiente de variação para o ensaio de embutimento e de resistência de ligações.

#### 4.1 Resistência ao embutimento

Os resultados obtidos nos ensaios de embutimento utilizando prego de 7.60 mm estão detalhados no Apêndice B e são apresentados de forma reduzida na Tabela 1. O valor da resistência foi calculado com a força máxima aplicada ou até atingir um deslizamento limite de 5,0 mm, de acordo com NBR 7190 (ABNT, 2022).

Tabela 1: Resultados dos ensaios de resistência ao embutimento.

Corpo de Prova	Força máx. (kN)	Resistência ao embutimento $f_{e0}$ (MPa)
CP1	8,17	63,42
CP2	7,10	56,96
CP3	6,42	52,14
CP4	6,89	55,28
Média	7,15	56,95
Desvio Padrão	0,74	4,75
Coef. de Variação	10,36%	8,35%

Fonte: Autor (2023).

Durante o ensaio foram registrados os dados correspondentes a forças e deslocamentos, incluindo a força máxima obtida no ensaio, quando houve o rompimento do corpo de prova, com a qual foi possível calcular a resistência ao embutimento, com a Equação 4, como apresentado na Tabela 1. O valor médio obtido foi 56,95 MPa, com coeficiente de variação baixo, de 8,35%, como esperado, uma vez que os corpos de prova foram retirados de uma mesma peça de madeira.

O valor obtido nos ensaios pode ser comparado com a resistência estimada obtida pela Equação 2:

$$f_{e,k} = 0,082 (1 - 0,01 \cdot 7,6) \cdot \frac{822,11}{1,2} = 51,91 \text{ MPa}$$

O valor do  $f_{e,k}$  de 51,91 MPa encontrado é apenas 8,8% menor que o resultado médio dos ensaios de Resistência ao Embutimento, que foi de 56,95 MPa, implicando ser uma boa estimativa para aplicação em cálculos teóricos somente com a densidade da madeira e o diâmetro do prego.

#### 4.2 Resistência das ligações pregadas na madeira

Os resultados dos ensaios de ligações na direção paralela às fibras da madeira com utilização de prego metálico de 7,6 mm são apresentados na Tabela 2, apresentando uma média de 42,10 kN, juntamente com os resultados previstos segundo a NBR 7190-1 (ABNT, 2022).

Tabela 2: Resultados dos ensaios de resistência de ligações pregadas. Fonte: Autor.

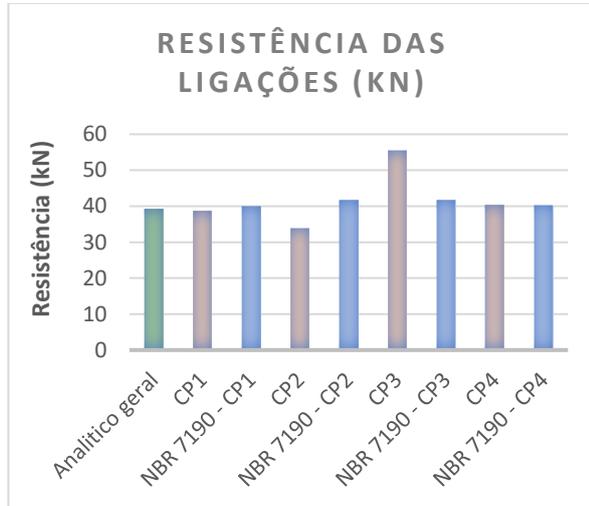
CORPO DE PROVA	Resistência da Ligação $R_k$ [kN]	Valor previsto NBR 7190 [kN]	Variação
CP - 1	38,70	39,79	-2,74%
CP - 2	33,80	41,64	-18,82%
CP - 3	55,70	41,68	33,64%
CP - 4	40,20	40,09	0,27%
Média	42,10	40,80	3,19%
Desvio Padrão	8,20	0,87	
Coef. De Variação	19,48%	2,12%	

Fonte: Autor (2023).

Para a comparação de resultados com a norma, foi necessário realizar os cálculos analiticamente de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022), como apresentado no item 2.2, fazendo uso da resistência ao embutimento do primeiro ensaio, utilizando o valor médio como fator  $f_{e0}$  para os cálculos de modos de falha. Para essa etapa também não foram considerados os coeficientes de modificação e minoração, de forma a fazer comparação sem coeficientes de segurança.

Para os cálculos, seguiu-se o modelo proposto pela NBR 7190 (ABNT, 2022), onde encontrou-se o valor teórico de 39,143 kN baseado em um elemento de ligação representado na Figura 10 como modelo geral, cujo memorial de cálculo encontra-se no Apêndice C. Os valores previstos apresentados na Tabela 2 foram calculados de modo semelhante, utilizando os dados de dimensão exatos de cada corpo de prova, que podem ser visualizados também com a Figura 14 em gráficos de barra.

Figura 14: Relação dos resultados experimentais e do modelo analítico.



Fonte: Autor (2023).

Pode-se notar que o valor previsto está próximo do que se observa na média dos resultados experimentais que foi 42,10 kN, porém o coeficiente de variação dos valores experimentais é significativo, tendo em vista que todas as peças foram retiradas da mesma viga, mas ainda abaixo é menor que o valor usual para a madeira, cerca de 20 %. Ressalta-se que não foram considerados os fatores de segurança, logo este não é um valor de cálculo.

Nota-se que a resistência do CP3 se mostrou muito maior que a média ao atingir 55,70 kN. Durante este ensaio, a peça foi submetida a uma carga maior no primeiro ciclo, chegando a 35 kN, diferente dos outros que foram até 25 kN, o que pode ser uma possível causa do ganho de resistência no ensaio. Os outros testes apresentaram resultados mais aproximados dos previstos, os testes 1 e 4 mostraram pouca variação em relação ao previsto, e o corpo de prova 2 se mostrou menos rígido, ao atingir o limite máximo de deslocamento de 15 mm antes do rompimento.

Quanto aos cálculos propostos pela NBR 7190 (ABNT, 2022), verificou-se que a resistência da ligação da madeira se deu pelo modo de falha II (equação 8), onde encontrou-se a menor resistência. Esse modo é caracterizado por apresentar a falha com a formação de uma rótula plástica, pois há flexão no pino, associada ao embutimento na madeira com rotação do pino, como pode-se observar na Figura 15, onde temos um dos corpos de prova aberto após o ensaio. Esse

foi realmente o modo de ruptura, pois é possível enxergar com clareza a predominância da flexão no pino e o embutimento nas peças laterais, que fica visível também na Figura 16 que mostra a ovalização do furo.

Figura 15: Modo de falha real em um corpo de prova aberto.



Fonte: Autor (2023).

Figura 16: vista lateral do corpo de prova durante o ensaio.



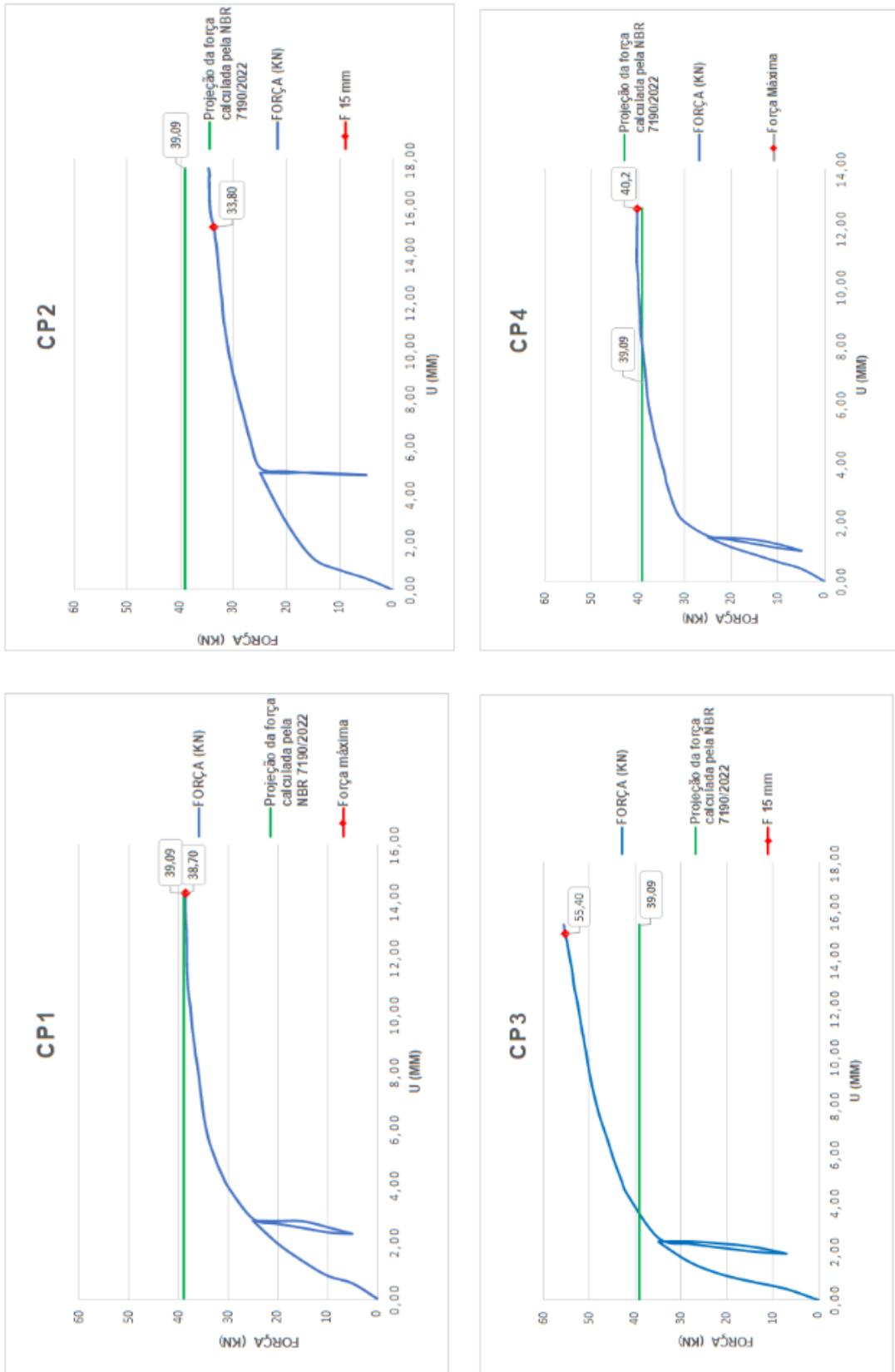
Fonte: Autor (2023).

#### 4.3 Rigidez Axial das ligações

Para o cálculo teórico da rigidez da NBR 7190 (ABNT, 2022) foi utilizado a equação 12 para peças com pré furo e com a densidade média encontrada de 822,11 kg/m<sup>3</sup>.

O comportamento Força x Deslizamento dos quatro corpos de prova estão apresentados nas Figuras 17.

Figura 17: Diagramas força x deslocamento provenientes dos ensaios de ligações pregadas.



Fonte: Autor (2023).

Para obtenção da rigidez experimental usou-se as Equações 14 e 15 do item 3.4, onde os valores para os módulos de deslizamento estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Rigidez K calculada com  $u_i$ , mod.

CP	$U_i$ , mod (mm)	$K_s$ (N/mm)	$K_s / 8$	$k_{ser}$ (N/mm)
CP1	2,75	9090,9	1136,4	7789,0
CP2	5,50	4545,5	568,2	
CP3	2,41	10360,5	1295,1	
CP4	1,33	18867,9	2358,5	
Média		10716,2	1339,5	7789,0

Fonte: Autor (2023).

Pode-se verificar que a expressão da norma para  $k_{ser}$  fornece valores superestimados, quando colocados em comparação com a rigidez inicial ( $K_s$ ) encontrada a partir do procedimento de ensaios da NBR 7190-5 (ABNT, 2022). Entretanto, se comparado ao valor de K obtido com o deslizamento elástico, o  $k_{ser}$  fica menos superestimado. Os valores de K calculados com  $u_{elástico}$  estão apresentados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Rigidez K calculada com  $u$  elástico.

CP	$U_e$ (mm)	$K_s$ (N/mm)	$K_s/8$	$k_{ser}$ (N/mm)
CP1	0,61	40783,0	5097,9	7789,0
CP2	0,24	102459,0	12807,4	
CP3	0,71	35063,1	4382,9	
CP4	0,60	41666,7	5208,3	
Média		54993,0	6874,1	7789,0

Fonte: Autor (2023).

Com isso pode-se deduzir que com o cálculo sugerido pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022), o valor teórico do  $k_{ser}$ , sendo superestimado, implica em uma expectativa de rigidez maior do que a obtida com os ensaios, logo teríamos deformações reais acima do

esperado, especialmente nas deformações iniciais. No entanto, após a acomodação da ligação, no fim primeiro ciclo de carregamento, a rigidez K, calculada com  $u$  elástico, representa a rigidez da ligação durante o restante da vida útil da estrutura. Essa última tem valor mais próximo de  $k_{ser}$ , sendo este, entretanto, ainda superestimado em relação ao ensaio, prevenindo deformações inferiores às reais, mesmo nessa fase.

## 5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados analisados e feitas as comparações pertinentes entre o modelo teórico e o experimental, nesse item são apresentadas as considerações finais.

O modo de falha presente nos ensaios condiz com a expectativa indicada pela normativa. Os valores calculados com as equações da NBR 7190 (ABNT, 2022), atendem a expectativa para cálculos de ligações pregadas de estruturas em madeira quanto à resistência, pois os resultados convergiram no final para valores médios experimentais com pouca diferença entre eles.

Quanto ao cálculo da rigidez, pode-se concluir que o resultado obtido teoricamente em função da densidade e do diâmetro do pino foi em média 82 % maior que os resultados obtidos com os ensaios, mostrando que a norma superestima a rigidez quando o cálculo é realizado com o deslizamento inicial modificado. Já com o deslocamento elástico, o valor do K ser previsto ficou mais próximo do experimental.

A fabricação de corpos de prova para ensaios com as dimensões estabelecidas pela norma é difícil, pois os tamanhos calculados nem sempre são possíveis de se obter a partir das peças disponíveis no mercado. Por isso, foi necessário trabalhar com peças de espessuras aproximadas em relação às previstas no cálculo inicial.

Os resultados experimentais de resistência apresentaram valores próximos dos previstos pela norma, pois a média geral das ligações teve pouca diferença quando comparada ao valor esperado. É importante ressaltar que para futuros trabalhos talvez seja necessário um maior número de amostras para se ter uma melhor confiabilidade na conclusão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 7190-1**: Projeto de estruturas de madeira Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro, ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 7190-3**: Projeto de estruturas de madeira Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro, ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 7190-5**: Projeto de estruturas de madeira Parte 5: Métodos de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos. Rio de Janeiro, ABNT, 2022.
- COMITE EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). EUROCODE 5: Design of timber structures – Parte 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004
- MOREIRA, M. S. S. **Ligações estruturais de peças de madeira por meio de adesivo em áreas reduzidas associado a elementos de pinos**. 2004, Dissertação (Doutorado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 44p.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**: Dimensionamento segundo a normas brasileira NBR 7190:97 e critérios das normas Norte-americana NDS e europeia EUROCODE 5. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC Ed., 2003.
- MAIA, B. B.; GÓES, J. L. N. **Resistência de ligações pregadas em madeira**. In: Congresso Latino-Americano de Estruturas de Madeira, 2., e Congresso Ibero-Latino Americano da Madeira na construção, 2., 2017, Buenos Aires. Anais... Buenos Aires: UNNOBA, OSCM, Lat-Rilem, 2017. 12 p.
- JOHANSEN, K. W. **Theory of timber connections**. International association for bridge and structural engineering, Zurich, v.9, p.249-262, 1949

## APÊNDICE A – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

Tabela 5: Dimensões das peças usadas no ensaio de embutimento da NBR 7190 (ABNT, 2022).

CORPO DE PROVA	ESPESSURA (mm)	ESP. DO PREGO	LARGURA (cm)	Altura (cm)
CP1	16,95	7,60	8,03	20,24
CP2	16,40	7,60	8,02	20,35
CP3	16,20	7,60	8,02	20,14
CP4	16,40	7,60	8,03	20,10
Média	16,49	7,60	8,03	20,21

Fonte: Autor (2023).

Tabela 6: Dimensões das peças usadas no ensaio de resistência de ligações da NBR 7190 (ABNT, 2022).

CORPO DE PROVA	CP1		CP2		CP3		CP4	
	X (cm)	Y(cm)						
<b>DIREITA</b>	19,8	20	19,6	20	20,2	19,8	19,3	20
<b>MEIO</b>	19,4	20,1	19,9	20	20,1	19,6	19,5	20,2
<b>ESQUERDA</b>	19,2	20,1	19,5	20,1	20,2	20	19,3	20,3
<b>MÉDIA</b>	19,47	20,07	19,67	20,03	20,17	19,80	19,37	20,17

Fonte: Autor (2023).

Tabela 7: Espessuras das peças usadas no ensaio de resistência de ligações da NBR 7190 (ABNT, 2022).

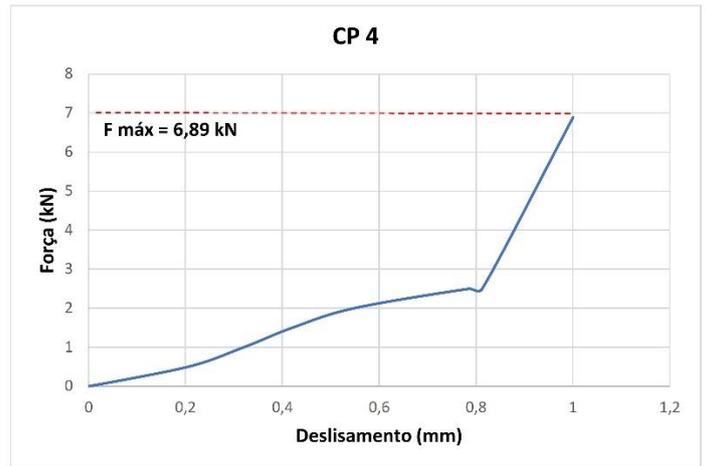
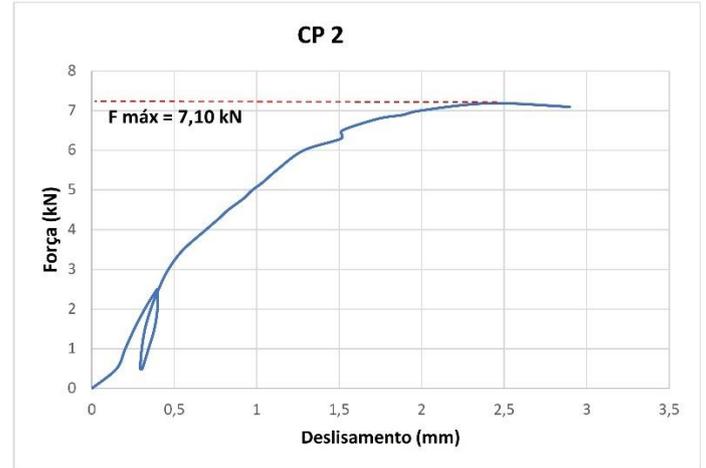
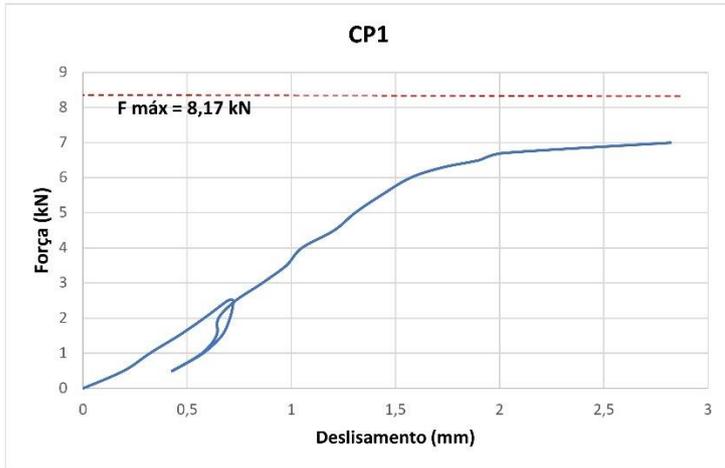
CORPO DE PROVA	ESPESSURA MÉDIA		
	ESQUERDA	CENTRO	DIREITA
CP1	24,68	45,43	23,38
CP2	25,98	45,75	25,60
CP3	25,65	46,00	25,82
CP4	23,75	45,58	24,20

Fonte: Autor (2023).

## APÊNDICE B – GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE EMBUTIMENTO NA DIREÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS – NBR 7190 (ABNT,2022).

Figura 21 - Gráficos de Força x Deslizamento [mm].

Fonte: Autor (2023).



## APÊNDICE C – CÁLCULOS PARA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES EM MADEIRA NA DIREÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS – NBR 7190 (ABNT,2022).

Para o cálculo da resistência ao embutimento os valores foram retirados da média dos ensaios de 4 CP's ensaiados em laboratório, para resistência de ligações foi calculada a ligação pregada na madeira com duas seções de corte, a espécie é a Cupiúba D40 e com 4 pregos 7,60 mm e não foram considerados os coeficientes de minoração ou de segurança.

Tabela 8 – Cálculo da resistência ao embutimento para os ensaios.

Embutimento	Espessura (média)	Prego	Área de embutimento (mm <sup>2</sup> )	F <sub>máx.</sub>	fe0 (Mpa)
CP1	16,95	7,60	128,82	8,17	63,42
CP2	16,40	7,60	124,64	7,10	56,96
CP3	16,20	7,60	123,12	6,42	52,14
CP4	16,40	7,60	124,64	6,89	55,28
				fe <sub>0</sub> , médio	56,952

Fonte: Autor (2023).

Resistência ao embutimento médio:  $f_{e0,médio} = 56,952 \text{ MPa}$

$d = 7,60 \text{ mm}$

Resistência última do aço:  $f_{u,k} = 600 \text{ MPa}$

Momento resistente do pino:  $M_{y,k} = 0,3 \cdot 600 \cdot 7,6^{2,6} = 35106,53 \text{ N} \cdot \text{mm}$

Considerando  $f_{e1,k} = f_{e2,k}$ , então  $\beta = 1$

Dimensões de projeto:

$$t1 = 22,50 \text{ mm} \quad t2 = 45 \text{ mm} \quad n_{sp} = 2 \quad e \quad n_{ef} = 4 \quad \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 0$$

Cálculo dos modos de falha:

$$(Ia) \quad F_{v,Rk1} = f_{e1,k} t1 d = 9,739 \text{ kN}$$

$$(Ib) \quad F_{v,Rk2} = 0,5 f_{e1,k} t2 d \beta = 9,739 \text{ kN}$$

$$(II) \quad F_{v,Rk3} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t1 d}{2+\beta} \left[ \sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta) M_{y,k}}{f_{e1,k} d t1^2} - \beta} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 4,887 \text{ kN}$$

$$(III) \quad F_{v,Rk4} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2 M_{y,k} f_{e1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 6,34 \text{ kN}$$

A resistência do pino ( $F_{v,Rk}$ ) é o menor valor encontrado entre os modos de falha, então  $F_{v,Rk} = F_{v,Rk3}$

Resistência total:  $R_k = F_{v,Rk} \cdot n_{sp} \cdot n_{ef} = 39,093 \text{ kN}$