

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**GUILHERME LENA SQUIZANI**

**VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE CARGA CRITICA EM PILARES  
DE MADEIRA DE ACORDO COM A NBR 7190/22**

**ALEGRETE**

**2023**

**GUILHERME LENA SQUIZANI**

**VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE CARGA CRITICA EM PILARES DE  
MADEIRA DE ACORDO COM A NBR 7190/22**

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: Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld.

**ALEGRETE**

**2023**

**GUILHERME LENA SQUIZANI**

**VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE CARGA CRÍTICA EM PILARES DE MADEIRA DE ACORDO COM A NBR 7190/22**

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: 23 de fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

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

Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA

Profa. Ma. RAQUEL CAROLINE ZYDECK - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **TELMO EGMAR CAMILO DEIFELD, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/02/2023, às 11:21, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/02/2023, às 15:41, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **RAQUEL CAROLINE ZYDECK, PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO**, em 24/02/2023, às 22:05, 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](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1063768** e o código CRC **4111ED4E**.

---

Dedico este trabalho ao meu futuro.

## **AGRADECIMENTO**

Ao Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld, que me orientou durante todo o processo de elaboração do trabalho,

Aos técnicos do laboratório de engenharia civil Marcelo de Jesus Dias de Oliveira e Raquel dos Santos Machado que me deram total suporte durante os ensaios,

A minha família e amigos, que sempre acreditaram em mim.

## RESUMO

Aprendemos desde o início da graduação, a responsabilidade que um engenheiro tem, seja para executar uma obra, como para projetar. O mesmo deve seguir sempre o que regem as normas que são disponibilizadas. Utilização de madeira na construção civil, cresce a cada dia mais, por se tratar de uma matéria prima renovável, que gera menos resíduos que outros materiais. Assim como qualquer outro tipo de material, a ABNT orienta o engenheiro de como projetar utilizando madeira de forma eficiente e segura, essa norma é a NRB 7190, que no ano de 2022 recebeu uma revisão, a revisão anterior foi feita no ano de 1997. Nesta norma podemos encontrar orientações sobre o dimensionamento de pilares e verificar sua estabilidade, que é exatamente o intuito deste trabalho, a primeira ideia era um comparativo de forma pratica e teórica, utilizando a norma e ensaios propostos na mesma. Mas com a revisão da norma, foi possibilitado também comparar com suas revisões. O trabalho também possibilitou o contato com a matéria prima que é oferecida no comercio local, que muitas vezes não possui nenhum registro sobre sua origem e qualidade, que também pode-se observar nos resultados obtidos.

Palavras-Chave: Pilares, engenharia, normas, madeira, construção.

## **ABSTRACT**

We learned from the beginning of graduation, the responsibility that an engineer has, whether to execute a work, or to design. It must always follow the rules that are made available. The use of wood in civil construction is growing every day, as it is a renewable raw material that generates less waste than other materials. Like any other type of material, ABNT guides the engineer on how to design using wood efficiently and safely, this standard is NRB 7190, which in 2022 received an update, the last revision was made in 1997. In this standard we can find guidelines on the dimensioning of columns and verify their stability, which is exactly the purpose of this work, the first idea was a practical and theoretical comparison, using the standard and tests proposed in it. But with the revision of the standard, it was also possible to compare with its revisions. The work also made possible the contact with the raw material that is offered in the local trade, which often does not have any record about its origin and quality, which can also be observed in the results obtained.

Keywords: Pillars, engineering, standards, wood, construction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de energia para produção de materiais de construção .....	14
Figura 2 – Fluxograma de caracterização das propriedades de resistência e rigidez das madeiras.....	19
Figura 3 – Carga crítica em colunas.....	28
Figura 4 – Mecanismo para análise da estabilidade .....	29
Figura 5 – Diagrama de corpo livre do pino .....	29
Figura 6 – Determinação da carga crítica .....	31
Figura 7 – Euler para colunas com vários tipos de apoio.....	34
Figura 8 – Fatores de comprimentos efetivos (k) .....	34
Figura 9 – Restrições para comprimentos efetivos em peças de madeira .....	39
Figura 10 – Corpos de prova para ensaio principal.....	43
Figura 11 – Conferencia das medidas dos corpos de prova .....	44
Figura 12 – Modelo de corpo de prova para determinação do teor de umidade e densidade aparente.....	44
Figura 13 – Corpos de prova para ensaio de umidade .....	45
Figura 14 – Processo de secagem e pesagem .....	46
Figura 15 – Modelo de corpo de prova para ensaio de compressão paralela as fibras .....	47
Figura 16 – Corpos de prova para ensaio de compressão paralela as fibras .....	48
Figura 17 – Ensaio de compressão paralela as fibras .....	48
Figura 18 – Ensaio principal .....	50
Figura 19 – Aparelhagem para receber os corpos de prova .....	51
Figura 20 – Identificação de defeitos nos corpos de prova .....	54
Figura 21 – Identificação de defeitos nos corpos de prova .....	55
Figura 22 – Gráfico Tensão x deformação específica .....	56
Figura 23 – Gráfico Tensão x deformação específica 8° CP .....	57
Figura 24 – Eixos propostos .....	59



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de umidade .....	18
Tabela 2 – Relações para os valores característicos das resistências .....	19
Tabela 3 – Relações para os valores característicos das resistências das coníferas e dicotiledôneas .....	20
Tabela 4 – Modulo aparente de elasticidade na flexão .....	20
Tabela 5 – Definição de classes de carregamento e valores de Kmod1 .....	21
Tabela 6 – Valores de Kmod2 .....	22
Tabela 7 – Valores de Kmod1 .....	22
Tabela 8 – Valores de Kmod2 .....	23
Tabela 9 – Valores de Kmod3 .....	23
Tabela 10 – Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos .....	25
Tabela 11 – Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais ....	26
Tabela 12 – Classes de resistência das coníferas .....	26
Tabela 13 – Classes de resistência das dicotiledôneas .....	27
Tabela 14 – Valores do coeficiente Ke .....	36
Tabela 15 – Coeficientes de fluência .....	42
Tabela 16 – Fatores de combinação de utilização .....	42
Tabela 17 – Índices de esbeltez e dimensões para ensaio .....	52
Tabela 18 – Valores médios Eucalyptus Alba .....	53
Tabela 19 – Ensaio de umidade .....	55
Tabela 20 – Valores dos ensaios de compressão paralelo as fibras .....	57
Tabela 21 – Correção da umidade .....	58
Tabela 22 – Cargas críticas teóricas .....	59
Tabela 23 – Ensaios principais .....	60
Tabela 24 – Comparativo entre métodos aplicados .....	60

# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 OBJETIVO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>15</b>
<b>2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Propriedades da Madeira.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.1 Umidade .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.2 Resistência da madeira serrada de acordo com a NBR 7190/22 .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3 Resistência da madeira serrada de acordo com a NBR 7190/97 .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Rigidez da Madeira de acordo com a NBR 7190/22 .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 Rigidez da Madeira de acordo com a NBR 7190/97 .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4 Coeficientes de Modificação de acordo com a NBR 7190/22 .....</b>	<b>21</b>
<b>2.5 Coeficientes de Modificação de acordo com a NBR 7190/97 .....</b>	<b>22</b>
<b>2.6 Coeficientes de ponderação da resistência para estados limites últimos .....</b>	<b>24</b>
<b>2.7 Estimativa de rigidez de acordo com a NBR 7190/22 .....</b>	<b>24</b>
<b>2.8 Estimativa de rigidez de acordo com a NBR 7190/97 .....</b>	<b>24</b>
<b>2.9 Classes de Resistência de acordo com a NBR 7190/22.....</b>	<b>25</b>
<b>2.10 Classes de Resistência de acordo com a NBR 7190/97 .....</b>	<b>26</b>
<b>2.11 Flambagem.....</b>	<b>27</b>
<b>2.11.1 Fórmula de Euler .....</b>	<b>30</b>
<b>2.11.1.1 Fórmula de Euler para colunas com extremidades articuladas.....</b>	<b>30</b>
<b>2.11.1.2 Fórmula de Euler para colunas com vários tipos de apoios .....</b>	<b>33</b>
<b>2.12 Verificação quando a resistência em peças de madeira de acordo com a NBR 7190/22 ....</b>	<b>35</b>

2.13 Verificação quando a resistência em peças de madeira de acordo com a NBR 7190/97 ....	38
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>43</b>
3.1 Ensaio Preliminares .....	43
3.1.1 Caracterização da Madeira .....	43
3.1.1.1 Ensaio visuais de identificação .....	43
3.1.1.2 Umidade .....	44
3.1.1.3 Correção dos dados referentes a umidade .....	45
3.1.1.3 Módulo de Elasticidade e Resistência de Compressão paralela as fibras .....	47
3.2 Ensaio de compressão dos pilares .....	49
3.2.1 Equipamentos para Ensaio .....	49
3.2.2 Procedimentos para Ensaio .....	49
3.3 Corpos de prova para ensaio .....	51
3.3.1 Dimensões .....	51
3.3.2 Quantidade de corpos de prova .....	52
3.3.3 Espécie de madeira .....	52
3.3.4 Carga crítica para os corpos de provas propostos .....	53
<b>4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>54</b>
4.1 Ensaio Preliminares .....	54
4.1.1 Ensaio visuais de identificação .....	54
4.1.2 Umidade .....	55
4.1.3 Módulo de Elasticidade e Resistência de Compressão paralela as fibras .....	56
4.1.4 Valores teóricos de carga critica de acordo com a NBR 7190/97 e NBR 7190/22 .....	58
4.2 Ensaio Principais .....	59

<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de madeira na construção civil é uma alternativa viável, por ter sua origem natural e renovável, em relação a outros materiais industrializados, como concreto, exige baixo consumo energético, os resíduos sólidos gerados também são inferiores, diminuindo os desperdícios. A madeira de reflorestamento, retira carbono da atmosfera, durante o processo de crescimento, ajudando na redução do efeito estufa, segundo DEMARZO *et al.* (2017), a maior parte do consumo energético da madeira de reflorestamento está ligada a extração e transporte da matéria-prima, em especial a distância das jazidas aos centros de produção e consumo, como podemos ver na figura 1, a diferença de consumo energético para produção de materiais para construção.

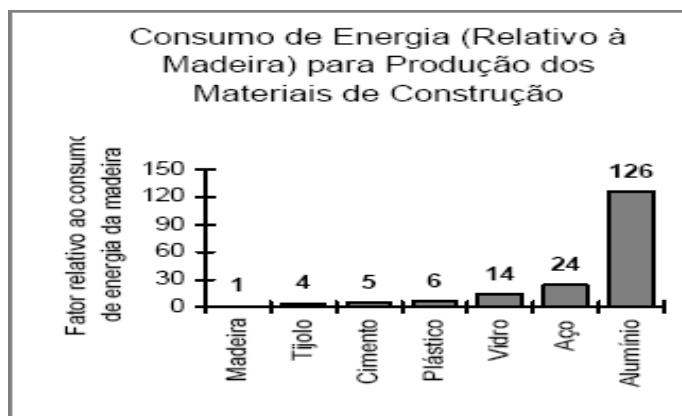
Porém como qualquer outro tipo de material, as partes que compõem a estrutura precisam de suas geometrias adequadas e bem definidas para terem resistência aos esforços solicitantes. Um projeto utilizando madeira deve ser bem elaborado, levando em consideração as necessidades do projeto, para que a escolha da espécie e dimensões da madeira utilizada estejam de acordo, de maneira que sejam evitados problemas e desperdícios com superdimensionamentos ou o subdimensionamento, levando a possíveis falhas estruturais.

Pilares são elementos estruturais dimensionados para resistir, principalmente, a compressão e flexo-compressão. A estabilidade do elemento, tem relação direta com sua esbeltez, que segundo a NBR 7190 pode ser definido pelo seu índice de esbeltez (ABNT, 1997).

Índice de esbeltez é uma grandeza utilizada para quantificar quanto uma barra comprimida é suscetível ao efeito chamado de flambagem, medida para verificação com que facilidade um pilar tende a encurvar, uma peça esbelta significa que a área de secção transversal é pequena em relação ao seu comprimento.

Para definir de maneira simples o efeito de flambagem, seria descrever uma peça que pode ser tão delgada que quando submetida a uma ação compressiva atingiria o colapso por deslocamento transversal ao eixo.

Figura 1 – Consumo de energia para a produção de materiais de construção.



Fonte – DEMARZO et al., 2017

## 1.1 OBJETIVO

Quão próximos seriam os dados coletados de forma experimental, para com, os dados que podemos gerar utilizando a norma?

Este trabalho de conclusão de curso, tem como objetivo principal, comparar os valores obtidos com a norma e os valores obtidos de forma experimental, utilizando os ensaios propostos.

Como objetivos específicos, tem-se:

- I. Dimensionar pilares de madeira em escala reduzida, para simular o comportamento quanto a resistência e estabilidade, identificando o valor de carga critica;
- II. Utilizando a NBR 7190/22 dimensionar de forma teórica pilares de madeira, e fazer verificações quanto a estabilidade e carga critica;
- III. Utilizando a NBR 7190/97, realizar os mesmos procedimentos do item II;
- IV. Comparar os valores obtidos nos itens I, II e III.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Justificando a necessidade de verificar a segurança dos critérios em relação a carga critica, propostos pela NBR 7190/1997 que no ano de 2022 a NBR 7190 recebeu uma revisão.

Engenheiros realizam projetos estruturais que atendam com máximo desempenho e menor custo possível, quatro características:

Equilíbrio;

Estabilidade;

Resistencia;

Rigidez.

Verificar ao quanto uma peça pode resistir ao um esforço de compressão antes de atingir o seu colapso por falta de estabilidade, como a NBR 7190 recebeu uma revisão no ano de 2022, justificaria o trabalho, comparamos o quão próximos ou não, são os valores propostos pela norma, se comparados a ensaios realizados no laboratório. Verificar a diferença entre as revisões da norma, também é uma

justificativa, analisar se as alterações representam melhores condições para elaboração de projetos estruturais utilizando madeira. Como podemos ver na figura 1 o consumo de energia para produção de materiais de construção, mostra que em relação a outros materiais, a madeira tem um baixo consumo para produção.



## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Propriedades da Madeira

Existe alguns fatores que servem de classificação da madeira para diversos fins, sendo eles: A densidade, uniformidade de anéis de crescimento, porcentagem de cerne e alborno, comprimento de fibra, inclinação da grã, porcentagem de vasos em folhosas, presença de madeira juvenil e lenho de reação, composição celular, presença de nós, orientação de grã e composição química (CHIES, 2005).

Segundo Meirelles e Pala (2010) a resistência da madeira difere segundo os três eixos principais: longitudinal, radial e tangencial, sendo que a resistência da madeira na direção paralela as fibras são maiores que nas outras direções, devido a continuidade da fibra, enquanto que na direção perpendicular a fibra (tangencial e radial) existem maiores vazios.

A estrutura anatômica condiciona as propriedades da madeira, devendo-se distinguir valores correspondentes à tração daqueles referentes à compressão, assim como os valores correspondentes à direção paralela às fibras em relação à direção perpendicular às fibras (MOTTA, 2011)

#### 2.1.1 Umidade

A NBR 7190 utiliza a umidade de 12% de referência para realização dos ensaios e valores de resistência nos cálculos para fins de função estrutural (ABNT,2022).

Para determinação do teor de umidade, utiliza-se o método que consiste realizar a medição da massa da amostra, coloca-la em uma estufa (103° +- 2° C), até que sua massa permaneça constante (considera-se que toda água evaporou) realiza-se mais uma medição da nova massa, dessa forma, através da equação 1 obtém-se o teor de umidade.

$$U (\%) = \left( \frac{m_i - m_s}{m_s} \right) \times 100 \quad \dots(1)$$

Onde:

$m_i$  = massa inicial da madeira (g);

$m_s$  = massa da madeira seca (g).

A função das classes de umidade segundo a NBR 7190, servem para ajustar as características de resistência e rigidez da madeira, isso relacionado com o ambiente onde serão utilizadas (ABNT,2022), a tabela 1 a seguir mostra as classes de umidades.

Tabela 1- Classes de umidade.

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente $U_{amb}$	Umidade de equilíbrio da madeira $U_{eq}$
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

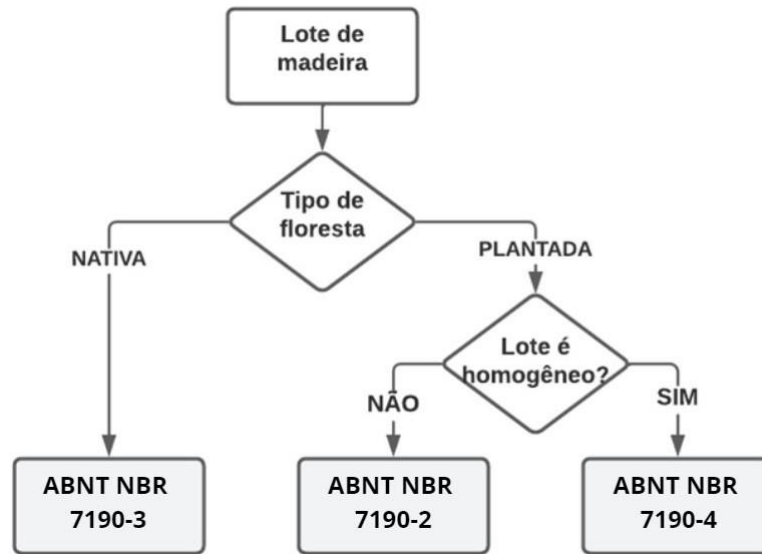
Fonte - NBR 7190 - 1 (2022, p.22)

### 2.1.2 Resistência da madeira serrada de acordo com a NBR 7190/22

Como o trabalho tem objetivo em relação ao efeito de flambagem em colunas ou pilares, será focado nos valores de resistência a compressão paralela as fibras ( $f_{wc,0}$  ou  $f_{c,0}$ ). Conforme a NBR 7190, estes valores são obtidos através de ensaios de compressão uniforme, onde os corpos-de-prova utilizados tem seção transversal quadrada de 5 cm de lado e 15 cm de comprimento (ABNT,2022).

A NBR 7190, orienta que não existindo comprovação do lote de madeira ser homogêneo, a caracterização das propriedades é atribuída a cada peça estrutural (classificação por peça) e não por lote (ABNT, 2022). Através da figura 2, podemos nos orientar para qual parte da norma, devemos buscar as informações sobre as propriedades de resistência e rigidez das madeiras.

Figura 2- Fluxograma de caracterização das propriedades de resistência e rigidez das madeiras.



Fonte – NBR 7190 (2022, p. 23).

### 2.1.3 Resistência da madeira serrada de acordo com a NBR 7190/97

Conforme a NBR 7190, estes valores são obtidos em ensaios de compressão uniforme, onde os corpos-de-prova utilizados tem seção transversal de 5 cm de lado e 15 cm de comprimento (ABNT,1997).

Mas a NBR 7190, permitia na falta de informações experimentais adotar algumas relações para os valores característicos nas seguintes tabelas 2 e 3 (ABNT,1997).

Tabela 2 – Relações para os valores característicos das resistências.

$$\frac{f_{c0,k}}{f_{t0,k}} = 0,77$$

$$\frac{f_{tM,k}}{f_{t0,k}} = 1$$

$$\frac{f_{c90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25$$

$$\frac{f_{e0,k}}{f_{c0,k}} = 1$$

$$\frac{f_{e90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25$$

Fonte - NBR 7190 (1997, p.15)

Tabela 3 - Relações para os valores característicos das resistências das coníferas e dicotiledôneas.

<b>Para coníferas</b>	$f_{v0,k}/f_{c0,k} = 0,15$
<b>Para dicotiledôneas</b>	$f_{v0,k}/f_{c0,k} = 0,12$

Fonte - NBR 7190 (1997, p.15)

## 2.2 Rigidez da Madeira de acordo com a NBR 7190/22

A NBR 7190 afirma que para determinar a rigidez da madeira na direção paralela as fibras, é necessário analisar o trecho linear do diagrama tensão x deformação específica, pois o módulo de elasticidade ( $E_{c0,med}$ ), é obtido pela reta secante deste diagrama, analisando o intervalo entre 10% e 50% da resistência à compressão paralela as fibras (ABNT, 2022), como mostrado na equação 2 a seguir:

$$E_{c0,med} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad \dots(2)$$

## 2.3 Rigidez da Madeira de acordo com a NBR 7190/97

Para determinar o valor médio ( $E_{c0,m}$ ) são necessários pelo menos dois ensaios, segundo a NBR 7190, pode-se também na falta de ensaios de compressão simples, determinar através do ensaio de flexão (ABNT,1997) como mostrado na tabela 4 abaixo:

Tabela 4 – Módulo aparente de elasticidade na flexão.

<b>Coníferas</b>	$E_M = 0,85E_{c0}$
<b>Dicotiledôneas</b>	$E_M = 0,9E_{c0}$

Fonte - NBR 7190 (1997, p.15)

## 2.4 Coeficientes de Modificação de acordo com a NBR 7190/22

De acordo com a NBR 7190, os coeficientes de modificação ( $K_{mod}$ ) modificam os valores de cálculo das características da madeira (ABNT,2022) através da equação 3 é obtido o coeficiente de modificação ( $K_{mod}$ ).

$$K_{mod} = K_{mod1} \cdot K_{mod2} \quad \dots(3)$$

Conforme a NBR 7190 o coeficiente parcial de modificação ( $K_{mod1}$ ) considera a classe de carregamento e o tipo de material, e o coeficiente parcial de modificação ( $K_{mod2}$ ) a classe de umidade e também o tipo de material (ABNT, 2022), como mostrado nas tabelas 5 e 6 respectivamente:

Tabela 5 – Definição de classes de carregamento e 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) e cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)	Madeira recomposta
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 - 1 (2022, p.14)

Tabela 6 – Valores de  $k_{mod2}$

Classes de umidade	Madeira serrada Madeira roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)	Madeira recomposta
	(1)	
(2)	0,90	0,95
(3)	0,80	0,93
(4)	0,70 <sup>a</sup>	0,90

<sup>a</sup> Não é permitido o uso do MLCC para classe de umidade (4).

Fonte - NBR 7190 - 1 (2022, p.15)

## 2.5 Coeficientes de Modificação de acordo com a NBR 7190/97

Segue a equação 4 para cálculo do coeficiente de modificação ( $K_{mod}$ ) de acordo com a NRB 7190 (ABNT, 1997).

$$K_{mod} = K_{mod1} \cdot K_{mod2} \cdot K_{mod3} \quad \dots(4)$$

Conforme a NBR 7190 o coeficiente parcial de modificação ( $K_{mod1}$ ) considera a classe de carregamento e o tipo de material (ABNT,1997) como mostrado na tabela 7 a seguir:

Tabela 7- Valores  $K_{mod}$  1.

Classes de carregamento	Tipos de madeira	
	Madeira serrada Madeira laminada colada Madeira compensada	Madeira recomposta
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,80	0,65
Curta duração	0,90	0,90
Instantânea	1,10	1,10

Fonte - NBR 7190 (1997, p.18).

Conforme a NBR 7190 o coeficiente parcial de modificação ( $K_{mod2}$ ) considera a classe de umidade e o tipo de material (ABNT,1997) como mostrado na tabela 8:

Tabela 8 - Valores de Kmod 2.

Classes de umidade	Madeira serrada	Madeira recomposta
	Madeira laminada colada Madeira compensada	
(1) e (2)	1	1
(3) e (4)	0,8	0,9

Fonte - NBR 7190 (1997, p.18).

Conforme a NBR 7190 o coeficiente parcial de modificação ( $K_{mod3}$ ) considera a categoria da madeira, sua espécie e a forma (ABNT,1997) como mostrado na próxima tabela 9:

Tabela 9 - Valores Kmod3.

Situação	$K_{mod3}$
Madeira de 2ª categoria	0,8
Madeira de 1ª categoria	1,0
Coníferas Madeira Serrada	0,8
(sempre)	1,0
Madeira laminada colada reta	
Madeira laminada colada curva	$1 - 2000(t/r)^2$
(t = espessura das lâminas, r= menor raio de curvatura)	

Fonte - NBR 7190 (1997, p.17).

## 2.6 Coeficientes de ponderação da resistência para estados limites últimos

Neste trabalho será analisado apenas a relação a compressão, segundo a NBR 7190 para tensões de compressão paralela as fibras tem o valor ( $\gamma_{wc} = 1,4$ ) (ABNT,2022).

Mas vale ressaltar que o valor básico decorrente de tensões de tração e cisalhamento paralelo as fibras são ( $\gamma_{wc} = 1,8$ )

## 2.7 Estimativa de rigidez de acordo com a NBR 7190/22

Como afirma a NBR 7190, para verificar os estados limites últimos referentes a estabilidade das peças comprimidas ou flexocomprimidas, admite-se para uso o valor característico do módulo de elasticidade ( $E_{0,05}$ ) ou 70% do ( $E_{c0,m}$ ) que representa o valor médio do módulo de elasticidade de compressão paralela as fibras, como mostrado na equação 5. Se houver necessidade, a equação 6 representa o módulo de elasticidade transversal (ABNT, 2022).

$$E_{0,05} = 0,7 \cdot E_{c0,m} \quad \dots (5)$$

$$G_{med} = \frac{E_{0,med}}{16} \quad \dots(6)$$

## 2.8 Estimativa de rigidez de acordo com a NBR 7190/97

Como afirma a NBR 7190, para utilização do módulo de elasticidade paralelo as fibras e o módulo de elasticidade transversal também, utiliza-se o valor efetivo (ABNT.1997), como mostrado na equação 7 e a equação 8 apresenta o módulo de elasticidade transversal.

$$E_{c0,ef} = K_{mod1} \cdot K_{mod2} \cdot K_{mod3} \cdot E_{c0,m} \quad \dots (7)$$

$$G_{ef} = \frac{E_{c0,ef}}{20} \quad \dots(8)$$



## 2.9 Classes de Resistência de acordo com a NBR 7190/22

As classes de resistência, servem segundo a NBR 7190, para que tenhamos a padronização das propriedades das madeiras, de forma a ajudar na escolha do tipo certo que será necessário utilizar (ABNT,2022), agilizando a procura pelo material certo para determinada demanda.

As madeiras são classificadas em: Coníferas, que é a designação corrente dada as plantas gimnospermas da divisão coniferopyta e as folhosas ou dicotiledôneas que são plantas angiospermas que possuem dois cotilédones na semente. As tabelas 10 e 11 se referem as espécies nativas e plantadas respectivamente.

Tabela 10 – Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de provas isentos de defeitos.

Classes	fc0k MPa	fv0, k MPa	Ec0, <u>med</u> MPa	Densidade a 12 % kg/m <sup>3</sup>
D20	20	4	10 000	500
D30	30	5	12 000	625
D40	40	6	14 500	750
D50	50	7	16 500	850
D60	60	8	19 500	1 000

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 - 1 (2022, p.12)

Tabela 11 – Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais.

		Coníferas													Folhosas						
Símbolo		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades de resistência																					
MPa																					
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	11	13,5
Cisalhamento	$f_{vk}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
Propriedades de rigidez																					
GPa																					
Módulo de elasticidade a 0° médio	$E_{0,m}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Módulo de elasticidade a 0° característico	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10	11	8	8,5	9,2	10	11	12	14	16,8
Módulo de elasticidade a 90° médio	$E_{90,m}$	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,33
Módulo de elasticidade transversal médio	$G_m$	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,25
Densidade																					
kg/m <sup>3</sup>																					
Densidade característica	$\rho_k$	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	560	620	700	900
Densidade média	$\rho_m$	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080
Nota 1		Valores obtidos conforme a ABNT NBR 7190-4.																			
Nota 2		Valores referentes ao teor de umidade igual a 12 %																			

Fonte - NBR 7190 - 1 (2022, p.12)

## 2.10 Classes de Resistência de acordo com a NBR 7190/97

As tabelas 12 e 13 se referem as classes de resistência das coníferas e dicotiledôneas respectivamente, em relação a NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 12 - Classes de resistência das coníferas.

Classes	$f_{c0k}$ MPa	$f_{vk}$ MPa	$E_{c0,m}$ MPa	$\rho_{bas,m}$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{aparente}$ kg/m <sup>3</sup>
<b>C 20</b>	20	4	3500	400	500
<b>C 25</b>	25	5	8500	450	550
<b>C30</b>	30	6	14500	500	600

Fonte - NBR 7190 (1997, p.16)

Tabela 13 - Classes de resistência das dicotiledôneas.

Dicotiledôneas					
(Valores na condição-padrão de referência U = 12%)					
Classes	$f_{c0k}$	$f_{vk}$	$E_{c0,m}$	<sup>1)</sup>	
	MPa	MPa	MPa	$\rho_{bas,m}$	$\rho_{aparente}$
				kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
C 20	20	4	9 500	500	650
C 30	30	5	14 500	650	800
C 40	40	6	19 500	750	950
C 60	60	8	24 500	800	1 000

<sup>1)</sup> Como definida em 6.1.2.

Fonte - NBR 7190 (1997, p.16).

Nas tabelas 10, 11, 12 e 13 percebe-se que os valores dados são característicos, mas fins de cálculo a NBR 7190 solicita a utilização dos valores de cálculo ( $X_d$ ) (ABNT,2022), que pode ser expressado pela equação 10:

$$X_d = K_{mod} \frac{X_k}{\gamma_w} \quad \dots(10)$$

Onde:

$K_{mod}$  = coeficiente de modificação;

$\gamma_w$  = coeficiente de minoração das propriedades da madeira,

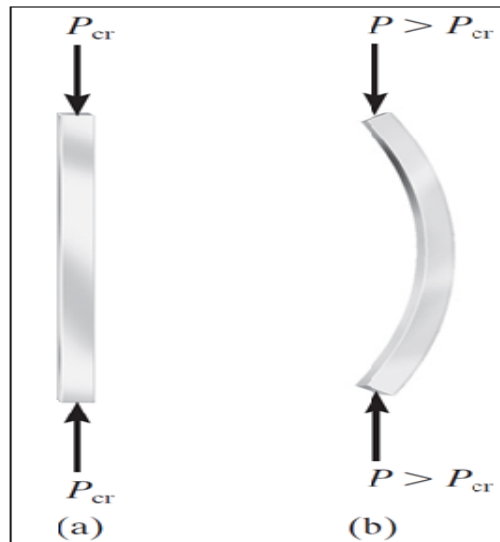
$X_k$  = valores característicos.

## 2.11 Flambagem

Entende-se por colunas ou pilares, elementos estruturais comprimidos e esbeltos que geralmente são submetidos a esforços axiais de compressão (Hibbler, 2010). A flambagem em colunas ocorre, devido a uma deflexão lateral da estrutura. O projeto de colunas deve receber atenção especial pois, na ocorrência de flambagem, a coluna apresenta, na maioria das vezes, falha imediata, desta forma devem estar bem dimensionadas a fim de suportar os carregamentos solicitados de forma a não sofrer flambagem (Hibbler, 2010).

Carga crítica ( $P_{cr}$ ) é a máxima carga axial que uma estrutura (coluna ou viga) pode suportar sem ocorrência de flambagem, a figura 3 descreve essa situação.

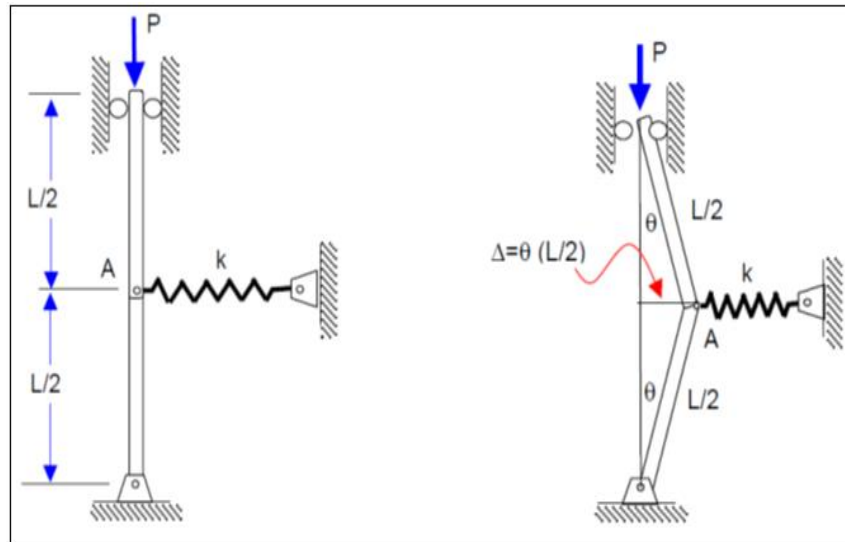
Figura 3 - Carga crítica em coluna.



Fonte – Hibbler (2010, p. 477).

Um pilar pode estar em equilíbrio estável ou instável, para entender melhor esse tipo de equilíbrio foi proposto, como observado na figura 4 abaixo. Observando o seguinte modelo, que considera duas barras rígidas ligadas por pinos nas suas extremidades, ligadas por uma mola de rigidez  $K$ . Uma pequena carga vertical  $P$  aplicada na parte superior do conjunto, desloca o ponto central do mecanismo para uma certa distância, com esta ação, a mola produz o que chamamos de força recuperativa. A carga  $P$ , produz duas componentes horizontais que podemos chamar de força perturbadora, considerando que a força recuperativa seja maior que a perturbadora, o equilíbrio está estável, pois o sistema consegue voltar à posição inicial, caso ocorra o contrário, onde a força perturbadora for maior que a força restauradora teremos um equilíbrio instável.

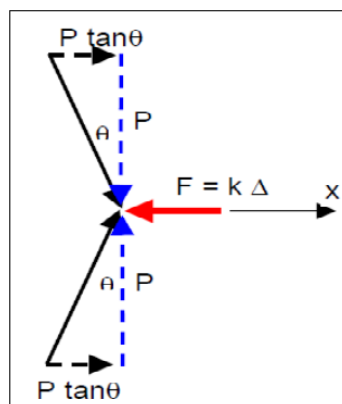
Figura 4- Mecanismo para análise da estabilidade.



Fonte – Adaptado do Hibbler (2010, p. 478).

Analisando a figura 5, no diagrama de corpo livre do pino, no instante que as barras são movimentadas, a força de recuperação da mola vale  $F = K\Delta$ , já as duas componentes horizontais  $Px = P \tan \theta$ , que tentam deslocar o pino ainda mais longe de sua posição inicial (equilíbrio), observando que o ângulo  $\theta$  tem pequenos valores, observamos dois pontos, que  $\Delta = \theta \frac{L}{2}$  e que,  $\tan \theta = \theta$ . Com essas análises, pode-se afirmar que a força de recuperação é  $F = K \theta \frac{L}{2}$  e a força perturbadora  $2Px = 2P\theta$  (Hibbler, 2010).

Figura 5 - Diagrama de corpo livre do pino.



Fonte – Adaptado do Hibbler (2010, p. 478).

### 2.11.1 Fórmula de Euler

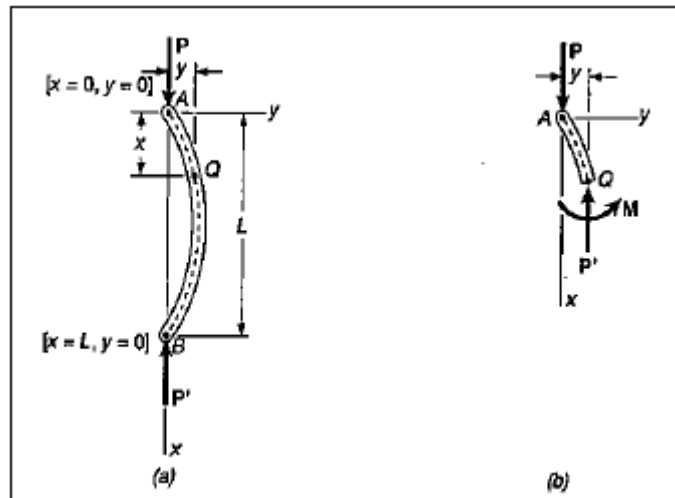
Para a determinação da carga crítica utilizando a equação de Euler, que idealizou uma situação ideal de coluna reta antes da aplicação da carga, onde está carga está sendo aplicada no centroide da seção transversal, que também sua composição um material homogêneo e que a coluna sofra flambagem ou flexão em apenas um dos planos (Hibbeler, 2010). Nataniel Wontoon Barbosa de Lima (2013, p. 21). Afirma que “[...]embora sejam tomadas diversas medidas na tentativa de efetuar um controle da qualidade do material que é utilizado para a produção dessas estruturas, há inúmeros fatores que acabam modificando algumas propriedades do mesmo”. Para começar, analisar uma coluna ideal, servira de base para uma análise de colunas tortas ou que recebam cargas excêntricas (Hibbler, 2010).

#### 2.11.1.1 Fórmula de Euler para colunas com extremidades articuladas

Considerando uma coluna ideal, para qual pretende-se determinar a carga crítica, estado em que a coluna deixa de ser estável, quando qualquer agitação provocaria flambagem na coluna, observa-se o novo comportamento da coluna (Beer, c 1996).

Para determinarmos a formula de Euler, vamos propor uma coluna ou barra com rótula nas duas extremidades (birotulada), com as variáveis  $L$  para o comprimento,  $P$  para carga e  $P_{cr}$  para carga crítica. A carga  $P$  é aplicada a coluna e sofre acréscimos até o valor de carga crítica  $P_{cr}$ , com essa condição a coluna estará instável, uma pequena força horizontal  $F$  mantém a coluna curvada (deflexão). Na figura 6 a idealização dessa coluna ideal.

Figura 6 - Determinação da carga crítica.



Fonte – Beer (c 1996, p.1084).

Vamos analisar a figura 6, a distância do ponto “A” até o ponto “Q” da sua linha elástica é representada pela variável  $x$ , e a deflexão desse ponto pela variável  $y$ , os dos eixos  $x$  e  $y$  são verticais com orientação de cima para baixo e horizontal orientado para direita respectivamente. Observando a parte “b” da figura 6 o equilíbrio de AQ, o momento fletor resultante em Q é  $M = -P \cdot y$ . se utilizarmos a equação diferencial que rege o comportamento da linha elástica equação 11.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad \dots(11)$$

Substituindo o momento fletor resultando na equação 8 e transpondo o último termo, estruturamos uma equação de segunda ordem, homogênea, com seus coeficientes constantes.

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{P}{EI} \cdot y = 0$$

Considerando,  $p^2 = \frac{P}{EI}$ , podemos reescrever a equação diferencial que descreve o movimento harmônico simples, equação 12:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + p^2 \cdot y = 0 \quad \dots(12)$$

A equação 12 é coordenada por  $x$  e não pelo tempo  $t$ , a solução geral dessa equação diferencial é representado pela equação 13:

$$y = A \sin px + B \cos px \quad \dots(13)$$

Observando a figura 6a e as condições de contorno que devem ser satisfeitas nos pontos A e B, inicialmente  $x = 0$  e  $y = 0$ , na equação 13 encontramos  $B = 0$ . Agora considerando  $x = L$  e  $y = 0$ , na equação 13 encontramos  $A \sin pL = 0$ .

Considerando  $A = 0$  ou para  $\sin pL = 0$ , tomando a primeira condição a equação 13 se reduz a  $y = 0$  e a coluna tem eixo reto. A segunda condição se satisfaz se  $pL = n\pi$  ou  $p^2 = \frac{P}{EI}$  chegamos à equação 14.

$$P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad \dots(14)$$

O menor valor de  $P$  que podemos definir usando a equação 11 corresponde a  $n=1$ . Encontra-se a fórmula de Euler como é conhecida, deduzida pelo matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783), equação 15:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad \dots(15)$$

Onde,

$P_{cr}$  = carga crítica ou carga axial na coluna logo antes da flambagem.

$E$  = módulo de elasticidade do material analisado.

$I$  = momento de inércia para a área da seção transversal da coluna.

$L$  = comprimento da coluna sem restrições.

Se forem consideradas colunas de seção transversal quadrada, tem-se que as inércias serão iguais para os eixos principais ( $x$  e  $y$ ), podendo existir flambagem em qualquer plano, já quando a seção transversal não for quadrada, o problema pode ocorrer na seguinte condição  $I = I_{min}$ , pois a flambagem ocorre em torno do eixo de



menor inércia, no plano perpendicular aos eixos principais de inércia analisadas (Beer, c 1996).

Considerando  $I = Ar^2$ , onde  $r$  representa a variável do raio de giração  $r = \sqrt{I/A}$ , desta forma a equação 16 pode ser reescrita em função da tensão crítica (Beer, c 1996).

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \quad \dots(16)$$

Onde:

$\sigma_{cr}$  = tensão crítica;

$E$  = módulo de elasticidade do material analisada;

$L$  = comprimento da coluna sem restrições;

$r$  = raio de giração da coluna;

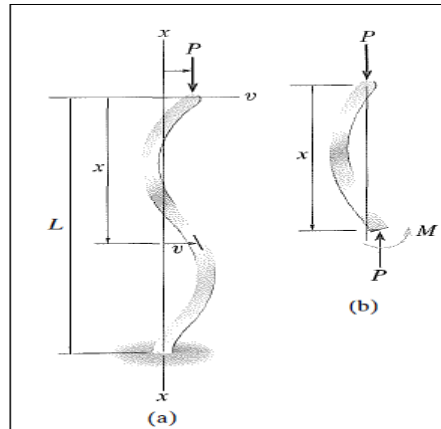
Deve-se ressaltar que o raio de giração a ser considerado é aquele que tem o menor momento de inércia da área da seção transversal da coluna, ou seja, o raio de giração mínimo (Beer, c 1996).

### 2.11.1.2 Fórmula de Euler para colunas com vários tipos de apoios

A fórmula de Euler foi deduzida considerando-se uma coluna ideal, com as extremidades fixadas com pinos, percebe-se que nem sempre será essa situação encontrada para análises, analisando a figura 7 uma coluna engastada na sua base e livre no topo, fazendo-se as mesmas análises que foram feitas para o primeiro tipo de coluna analisada, tem-se uma equação diferencial para a curva de deflexão, porém está não será homogênea, utilizando novamente as condições de contorno, tem-se à equação de carga crítica, fazendo uma análise percebe-se que esse tipo de situação a coluna tende a resistir apenas um quarto da carga crítica da coluna fixada com pinos como mostrada na equação 17 (Beer, c 1996).

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad \dots(17)$$

Figura 7- Euler para colunas com vários tipos de apoio.

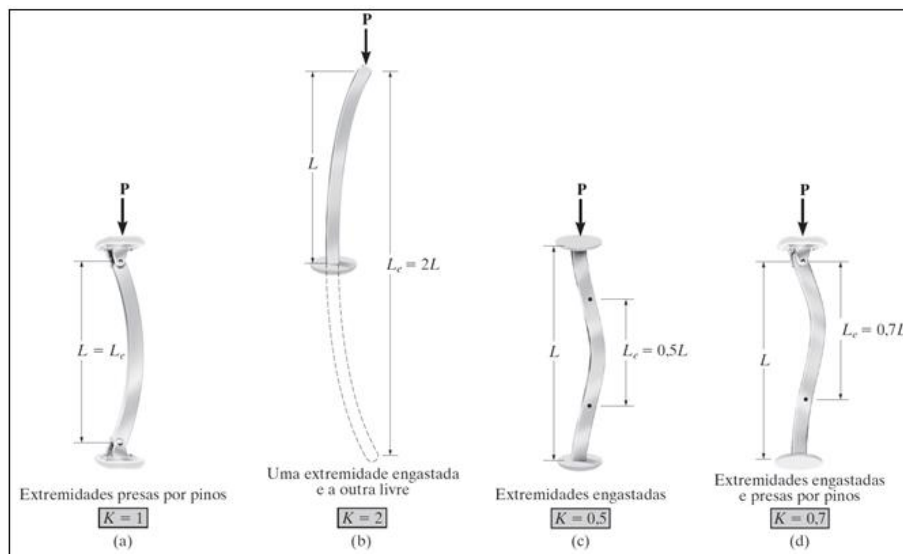


Fonte – Hibbler (2010, p.483).

Tendo essa ideia, pode-se fazer a análise e a dedução da carga crítica para qualquer situação de apoio, considerando que o  $L$  na equação seja sempre a “distância sem apoio entre os pontos de momento nulo” (Beer, 2008), podemos chamar essa distância de comprimento efetivo ( $L_e$ ). A figura 8 representa os fatores de comprimentos efetivos

Pode-se considerar em vez de comprimento efetivo, um coeficiente adimensional chamado fator de comprimento efetivo ( $k$ ), mostrados na equação 18.

Figura 8 - Fatores de comprimentos efetivos ( $k$ ).



Fonte – Hibbler (2010, p.484).

$$L_e = KL \quad \dots(18)$$

Desta forma chegam-se a duas equações 19 e 20 gerais utilizando o método de Euler.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad \dots(19)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad \dots(20)$$

## 2.12 Verificação quando a resistência e estabilidade em peças de madeira de acordo com a NBR 7190/22

Os esforços resistentes em estados limites últimos para ocorrência de flambagem, ocorrem através compressão paralela as fibras e flexocompressão.

Segundo NBR 7190 para análise da segurança em relação a resistência de peças submetidas a flexocompressão analisando sua seção transversal deve seguir respeitar as equações 21 e 22 (ABNT,2022).

$$\left( \frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad \dots(21)$$

$$\left( \frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad \dots(22)$$

Onde:

$\sigma_{Nc,d}$  = valor de cálculo da parcela de tensão normal (apenas força normal de compressão);

$\sigma_{Mx,d}$  e  $\sigma_{My,d}$  = tensões máximas devidas as componentes de flexão;

$f_{c0,d}$  = resistência de cálculo à compressão paralela as fibras;

$K_M$  = coeficiente de correção em relação a forma geométrica da seção transversal da peça, seções retangulares ( $K_M = 0,7$ ), outras seções ( $K_M = 1,0$ ).

Segundo NBR 7190 para análise da segurança em relação a resistência de peças submetidas a flexocompressão analisando sua seção transversal deve respeitar as verificações propostas nas equações 23 e 24 (ABNT,1997).

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad \dots(23)$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} + k_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad \dots(24)$$

Onde:

$\sigma_{Nc,d}$  = valor de cálculo da parcela de tensão normal (apenas força normal de compressão);

$\sigma_{Mx,d}$  e  $\sigma_{My,d}$  = tensões máximas devidas as componentes de flexão;

$f_{c0,d}$  = resistência de cálculo à compressão paralela as fibras, igual a  $f_{t0,d}$ ;

$K_M$  = coeficiente de correção em relação a forma geométrica da seção transversal da peça, seções retangulares ( $K_M = 0,5$ ), outras seções ( $K_M = 1,0$ ).

As colunas são classificadas conforme seu índice de esbeltez ( $\lambda$ ), que leva em consideração o comprimento de flambagem ( $L_0 = K_E \cdot L$ ) e o menor raio de giração ( $i_{min}$  ou  $r$ ) na seguinte equação 25 e a tabela 6 descreve os valores para o coeficiente  $K_E$ .

Tabela 14 – Valores do coeficiente  $K_E$

Modos de flambagem						
Valores de projeto para $K_E$	0,65	0,8	1,2	1	2,1	2,4
Código das condições de extremidade	—	—	—	—	—	—
		Rotação e translação lateral impedidas, translação vertical livre				
		Rotação e translação vertical livres, translação lateral impedida				
		Rotação livre e translações impedidas				
		Rotação impedida e translações livres				
		Rotação e translações livres				

Fonte – NBR7190 (2022, p.25).

$$\lambda = \frac{L_e}{\sqrt{I/A}} \quad \dots(25)$$

A NBR 7190 realiza as verificações em relação a estabilidade de peças comprimidas através da **esbeltez relativa** (ABNT, 2022).

Os índices de esbeltez relativa são classificados pelas equações 26 e 27 respectivamente.

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad \dots(26)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad \dots(27)$$

Onde:

$\lambda_{rel,x}$  e  $\lambda_{rel,y}$  = índices de esbeltez relativa correspondentes a flexão normal em relação a x e y respectivamente;

$\lambda_x$  e  $\lambda_y$  = índices de esbeltez segundo os eixos x e y respectivamente;

$E_{0,05}$  = Valor característico do módulo de elasticidade medido na direção paralela as fibras da madeira.

Satisfazendo as duas relações  $\lambda_{rel,x} \leq 0,3$  e  $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$ , as tensões devem respeitar as condições de compressão ou flexo compressão apenas, retirando a necessidade de verificar a estabilidade da peça.

Caso contrário, devem ser verificados as condições de estabilidade através das inequações 28 e 29 respectivamente.

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{K_{cx}f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad \dots(28)$$

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{K_{cy}f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} + K_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad \dots(29)$$

Onde:

$\sigma_{Mxy,d}$  = Tensões máximas de cálculo devidas as componentes de flexão atuantes segundo as direções principais,

$\sigma_{Nc,d}$  = Valor de cálculo da tensão de compressão normal as seções transversais;

$K_M$  = coeficiente de correção, seção retangular (0,7), outras seções transversais (1,0).

Para calcular os dois coeficientes  $K_{cx}$  e  $K_{cy}$  presentes nas equações 28 e 29, devem ser utilizadas as equações 30 e 31:

$$K_{cx} = \frac{1}{K_x + \sqrt{(K_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}} \quad \dots(30)$$

$$K_{cy} = \frac{1}{K_y + \sqrt{(K_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}} \quad \dots(31)$$

Em que:

$$K_x = 0,5 [1 + \beta_c (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2]$$

E

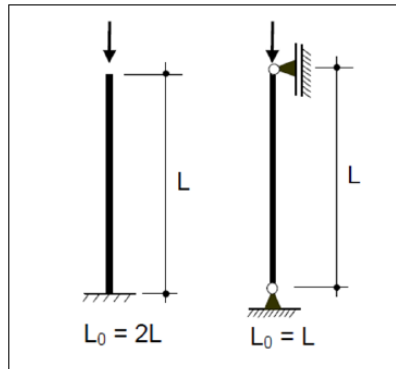
$$K_y = 0,5 [1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2]$$

Onde  $\beta_c$  é o fator para peças estruturais que atendam aos limites de divergência de alinhamento, madeira maciça serrada e peças roliças (0,2) e para madeiras lamelada (MLC e MLCC) e madeira laminada (LVL) (0,1).

### 2.13 Verificação quando a resistência e estabilidade em peças de madeira de acordo com a NBR 7190/97

O **comprimento efetivo** segundo a NBR 7190 se restringe a duas variações, as extremidades presas por pinos ou barras articuladas-articuladas, uma extremidade engastada e a outra livre ou engaste-articulação (ABNT, 1997). A figura 9 apresenta as duas restrições para comprimentos efetivos em peças de madeira

Figura 9 - Restrições para comprimentos efetivos em peças de madeira.



Fonte – Deifeld (2016, p. 3)

As colunas são classificadas conforme seu **índice de esbeltez** ( $\lambda$ ), que leva em consideração o comprimento efetivo ( $L_e$ ) e o menor raio de giração ( $i_{min}$  ou  $r$ ) na seguinte equação 32

$$\lambda = \frac{L_e}{\sqrt{I/A}} \quad \dots(32)$$

Desta forma segundo a NBR 7190 as colunas são classificadas de três formas em relação ao seu **índice de esbeltez** (ABNT,1997).

Denominada curta, quando índice de esbeltez for menor ou igual a quarenta ( $\lambda \leq 40$ ), nesta situação leva-se em conta apenas a carga axial, sem efeitos relativos à instabilidade da peça. A condição de segurança segundo a NBR 7190 é dada pela equação 33:

$$\sigma_{c0,d} = \frac{N_d}{A_w} \leq f_{c0,d} \quad \dots(33)$$

Onde:

$\sigma_{c0,d}$  = tensão de cálculo em relação a sollicitação de compressão;

$f_{c0,d}$  = resistência a compressão paralela as fibras;

$N_d$  = esforço normal solicitante;

$A_w$  = área bruta da seção transversal.

Peças semi-esbeltas ( $40 < \lambda \leq 80$ ), que tem sua falha por esmagamento ou flexão (perda de estabilidade) (aula slide, ano). Mesmo para carga de centrada a NBR 7190 exige verificação de flexo-compressão, a análise deve ser feita nos dois planos de rigidez (ABNT,1997).

A NBR 7190 solicita a condição de segurança em relação ao estado limite ultimo de instabilidade, que o ponto mais comprimido da seção transversal consiga atender a condição da equação 34 (ABNT,1997):

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{co,d}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{co,d}} \leq 1 \quad \dots(34)$$

Em que:

$\sigma_{Nd}$  = tensão de compressão devido a força normal;

$\sigma_{Md}$  = tensão de compressão devido ao momento fletor.

Essa tensão de compressão devido ao momento fletor, deve considerar os dois planos de rigidez da peça e é calculado pelas equações 35 e 36:

$$\sigma_{Mdx,y} = \frac{M_{dx,y} Y_{,X}}{I_{x,y}} \quad \dots(35)$$

$$M_{dx,y} = N_d e_{dx,y} \quad \dots(36)$$

Definimos  $e_d$  segundo a NBR 7190, como a excentricidade de cálculo que é dada pelas seguintes equações 37, 38, 39, 40 (ABNT,1997):

$$e_d = e_1 \left( \frac{F_E}{F_E - N_d} \right) \quad \dots(37)$$

$$e_1 = e_i + e_a \quad \dots(38)$$

$$e_a = \frac{L_0}{300} \geq \frac{h}{30} \quad \dots(39)$$

$$e_i = \frac{M_{1d}}{N_d} \geq \frac{h}{30} \quad \dots(40)$$

Nessas equações,  $e_i$  é uma excentricidade decorrente aos valores de cálculo devido ao momento fletor gerado e a força normal,  $h$  se refere a altura da seção transversal do plano verificado.



Também devemos ressaltar que na equação, temos a equação da carga crítica de Euler equação 41 (ABNT,1997).

$$F_E = \frac{\pi^2 E_{c0,ef} I}{L_0^2} \quad \dots(40)$$

Por último temos as peças esbeltas ( $\lambda > 80$ ), limitando esse valor em cento e quarenta (140), deve-se segundo a NBR 7190 atender a equação 34 de forma parecida com a verificação feita em peças semi-esbeltas, no caso se usa as seguintes equações 41, 42, 43 e 44 (ABNT,1997):

$$e_{1,ef} = e_1 + e_c = e_i + e_a + e_c \quad \dots(41)$$

$$e_i = \frac{M_{1,d}}{N_d} = \frac{M_{1gd} + M_{1qd}}{N_d} \quad \dots(42)$$

$$e_c = (e_{ig} + e_a) \left\{ \exp \left[ \frac{\phi [N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}]}{F_E - [N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}]} \right] - 1 \right\} \quad \dots(43)$$

$$e_{ig} = \frac{M_{1g,d}}{N_{gd}} \quad \dots(44)$$

A NBR 7190, explica que  $e_i$  é a excentricidade de primeira ordem vinda da situação de projeto, a equação para o cálculo de  $e_a$  é a mesma para peças semi-esbeltas, já para o cálculo de  $e_i$  estão presentes os valores de momentos fletores vindos das cargas permanentes e variáveis. Já para determinar  $e_{ig}$  deve-se considerar apenas os momentos fletores derivados das cargas permanentes (ABNT,1997).

A equação 43 segundo a NBR 7190 tem relação com a fluência da madeira, sendo uma excentricidade suplementar de primeira ordem, os valores de  $N_{gk}$  e  $N_{qk}$  são as forças normais vindos dos carregamentos permanentes e variáveis,  $\psi_1$  e  $\psi_2$  são os fatores de combinação e de utilização e  $\phi$  é o coeficiente em relação a fluência (ABNT 1997) essas duas últimas incógnitas são mostradas nas tabelas 15 e 16 a seguir:

Tabela 15 – Coeficientes de fluência  $\phi$ .

Classes de carregamento	Classes de umidade	
	(1) e (2)	(3) e (4)
Permanente ou de longa duração	0,8	2
Média duração	0,3	1
Curta duração	0,1	0,5

Fonte - NBR 7190 (1997, p.26).

Tabela 16 - Fatores de combinação de utilização.

Ações em estruturas correntes	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
- Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
- Pressão dinâmica do vento	0,5	0,2	0
Cargas acidentais dos edifícios	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
- Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos fixos, nem de elevadas concentrações de pessoas	0,4	0,3	0,2
- Locais onde há predominância de pesos de equipamentos fixos, ou de elevadas concentrações de pessoas	0,7	0,6	0,4
- Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
- Pontes de pedestres	0,4	0,3	0,2 <sup>1</sup>
- Pontes rodoviárias	0,6	0,4	0,2 <sup>1</sup>
- Pontes ferroviárias (ferrovias não especializadas)	0,8	0,6	0,4 <sup>1</sup>

1) Admite-se  $\gamma_2 = 0$  quando a ação variável principal corresponde a um efeito sísmico.

Fonte - NBR 7190 (1997, p.9)

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Ensaios Preliminares

##### 3.1.1 Caracterização da Madeira

###### 3.1.1.1 Ensaios visuais de identificação

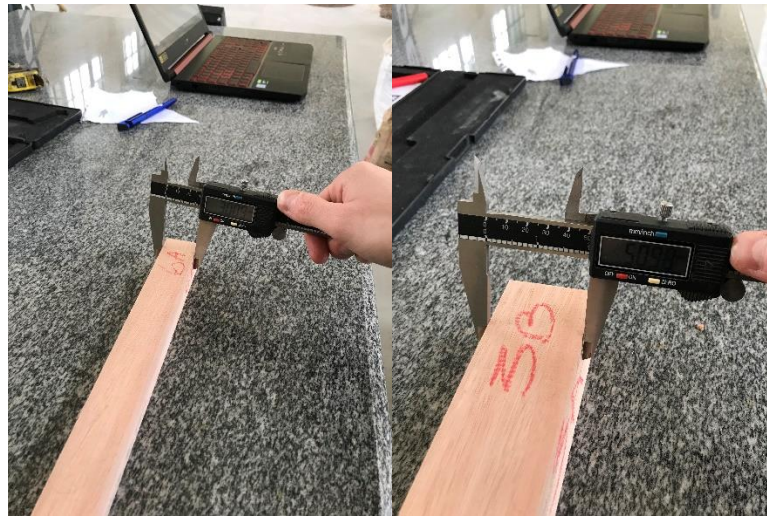
Os corpos de provas, para os ensaios principais e ensaios preliminares, foram adquiridos, mas por não existir um registro da procedência desse material, que segundo o vendedor era eucalipto branco (*Eucalyptus alba*), foi feita uma análise dos corpos de prova e anotados pequenos detalhes (deformidades nas peças, rachaduras ou marcas de mofo), a figura 10 mostra os corpos de prova que foram utilizados nos ensaios e a figura 11 as conferências feitas nos corpos de prova.

Figura 10 – Corpos de prova para ensaio principal.



Fonte – Autoria própria.

Figura 11 – Conferência das medidas dos corpos de prova.

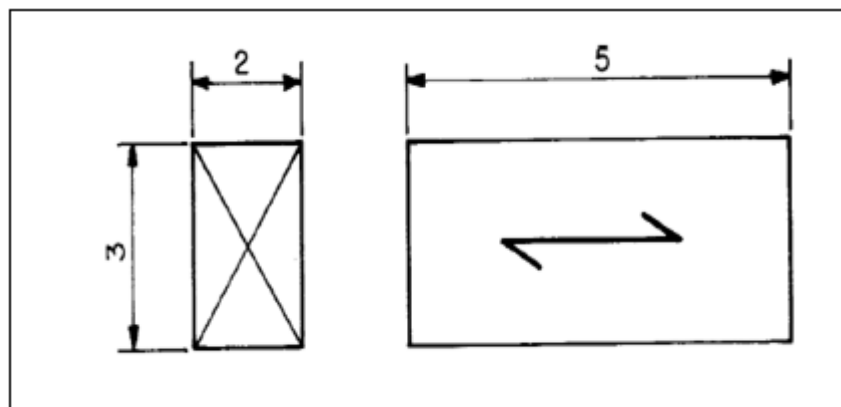


Fonte – Autoria própria.

### 3.1.1.2 Umidade

Seguindo a NBR 7190 para realização dos ensaios, para determinação do teor de umidade, de lotes considerados homogêneos, separa-se corpos de provas das colunas (ABNT,2022). No item 2.1.1.1 deste trabalho é descrito a fundamentação teórica para realização deste ensaio, utilizando a equação 1. A figura 12 mostra o modelo de corpo de prova.

Figura 12 - Modelo de corpo de prova para determinação do teor de umidade e densidade aparente.



Fonte: NBR 7190-3 (2022, p. 06)

O procedimento para determinação da umidade deve seguir o seguinte roteiro:

A determinação da massa inicial ( $m_i$ ) dos corpos de prova, os mesmos são colocados na câmara de secagem ( $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ), a medição deve ser feita de 6 h até que a variação seja menor ou igual a 0,5% da última medida. Com isso é obtido a massa seca ( $m_s$ ).

Seguindo as orientações da NBR 7190, foram confeccionados oitos corpos de prova, utilizando uma plaina industrial, os corpos de prova são apresentados na figura 13:

Figura 13 – Corpos de prova para ensaio de umidade.



Fonte – Autoria própria.

Antes de serem colocados na estufa, os corpos de prova foram pesados e suas medidas anotadas ( $m_i$ ). A cada seis horas foram feitas pesagens, até que a diferença fosse de 0,5%, com isso essa medida foi anotada ( $m_s$ ). Com esses valores e utilizando a equação 1 o teor de umidade pode ser determinado.

### 3.1.1.3 Correção dos dados referentes a umidade

A NBR 7190, estabelece que as propriedades de resistência e rigidez da madeira, são correspondentes a classe 1 de umidade (12%) como condição padrão de referência para os ensaios (ABNT, 2022)

Para caracterização usual das propriedades de resistência e rigidez de um lote de material, com diferentes teores de umidade, a norma propõe uma correção, com as equações 45 e 46 e a figura 14 mostra o processo de secagem e pesagem dos corpos de prova

$$f_{12} = f_u \left[ 1 + \frac{3(U-12)}{100} \right] \quad \dots(45)$$

$$E_{12} = E_u \left[ 1 + \frac{3(U-12)}{100} \right] \quad \dots(46)$$

Figura 14 - Processo de secagem e pesagem.



Fonte – Autoria própria.

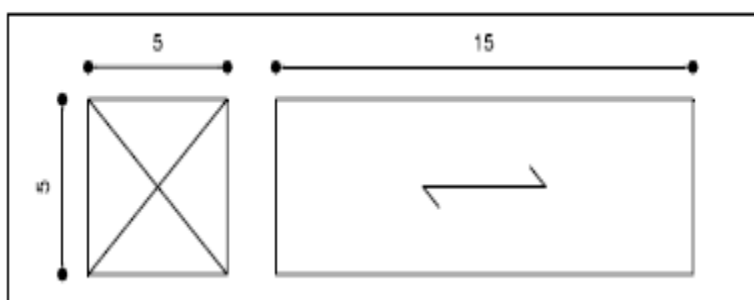
### 3.1.1.3 Módulo de Elasticidade e Resistência de Compressão paralela as fibras

Segundo a NBR 7190, a resistência de compressão paralela as fibras ( $f_{c0}$ ) vem da máxima tensão de compressão que o corpo de prova pode resistir (ABNT,2022). Como descrito no item 2.1.3 caracterização da rigidez da madeira.

Para a determinação do módulo de elasticidade serão medidas as deformações em pelo menos duas faces dos corpos de prova, utilizando LVDTs, fixados por meio de cantoneiras metálicas pregadas no corpo de prova (10 cm de distância nominal entre duas linhas de pregação).

Segundo a NBR 7190 as dimensões dos corpos de prova para determinação do módulo de elasticidade (ABNT,2022), são mostrados na figura 15.

Figura 15- Modelo de corpo de prova para ensaio de compressão paralela as fibras.



Fonte - NBR 7190 (2022, p.11)

Para preparação dos corpos de prova, foram coladas cantoneiras metálicas em duas faces, para que os extensômetros fossem apoiados nos mesmos utilizando as garras disponíveis no laboratório, como mostrado na figura 16.

Figura 16 – Corpos de prova para ensaio de compressão paralela as fibras.



Fonte – autoria própria.

Após os ensaios o software da prensa elétrica, recolheu os dados de cada um dos onze corpos de prova ensaiados, um dos corpos de prova se rompeu de forma inesperada, sendo descartado. Na figura 17 mostra o ensaio montado.

Figura 17 – Ensaio compressão paralela as fibras.



Fonte – autoria própria.



Com os dados foram gerados gráficos, utilizando as indicações descritas no item 2.1.3 e a equação 2, para determinar o módulo de elasticidade desta espécie de madeira.

## **3.2 Ensaio de compressão dos pilares**

### **3.2.1 Equipamentos para Ensaio**

Os ensaios de compressão serão realizados de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022) através de uma prensa elétrica da EMIC modelo DL20000.

### **3.2.2 Procedimentos para Ensaio**

Deve-se posicionar os pilares, no centro da prensa hidráulica, para minimizar a excentricidade acidental e obter a resultante da carga axial aplicada, no eixo.

Posicionar os LVDT em duas faces não opostas, próximos ao centro e ligar ao sistema de aquisição de dados. Os extensômetros devem ser ajustados com apoio de garras, para medir o deslocamento nos dois sentidos do eixo.

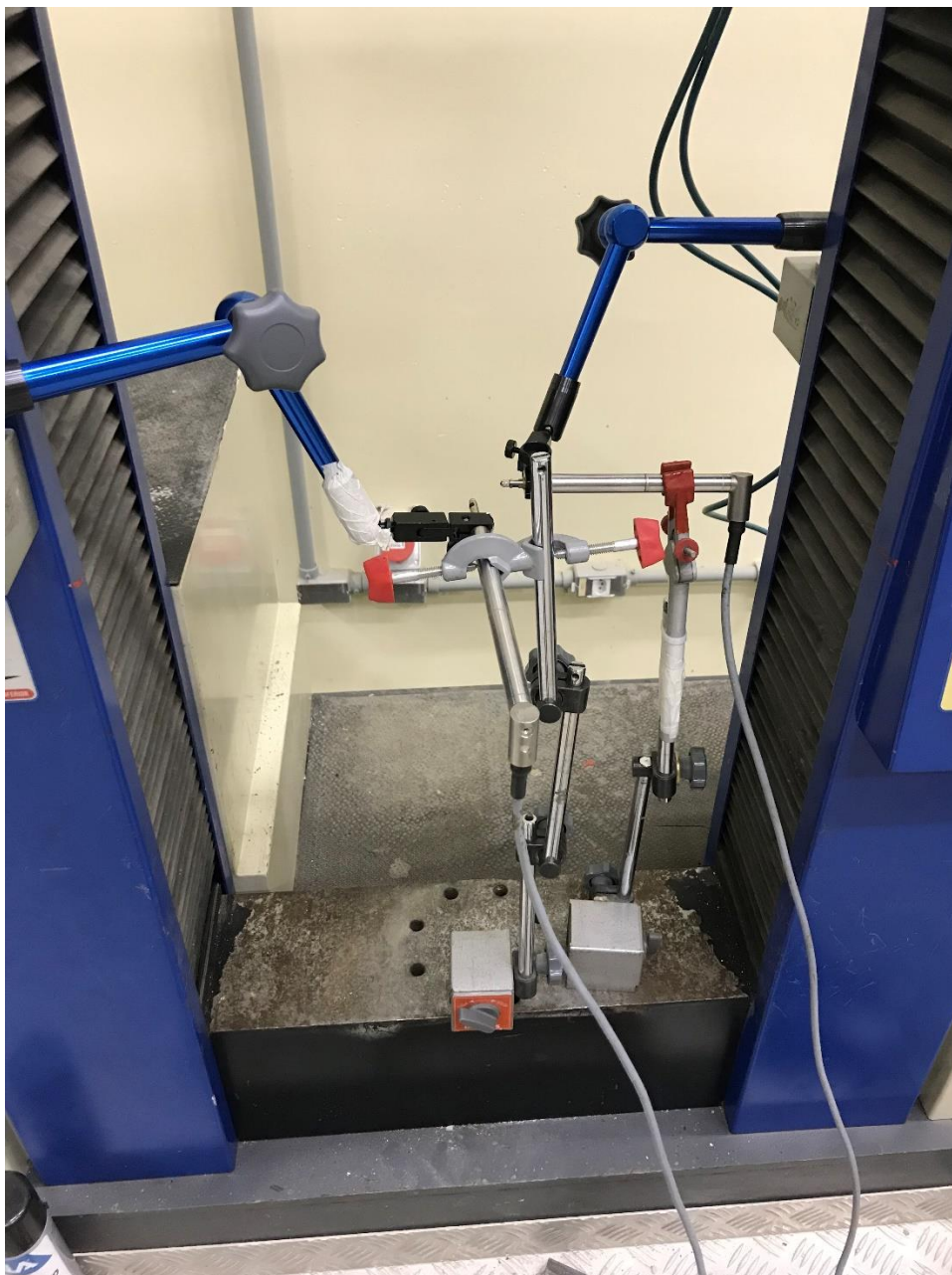
O pilar será carregado e simultaneamente anotadas as leituras dos deslocamentos, através dos LVDTs. A partir do momento em que, com carga continuar constante e o pilar continuar a aumentar os deslocamentos laterais, o ensaio deverá ser interrompido (FLAVIA CAETANO, 2001, p.53). A figura 18 mostra o ensaio montado e a figura 19 mostra a aparelhagem sem o corpo de prova.

Figura 18 – Ensaio principal



Fonte – autoria própria.

Figura 19 – Aparelhagem para receber os corpos de prova.



Fonte – Autoria própria.

### 3.3 Corpos de prova para ensaio

#### 3.3.1 Dimensões

Nesta parte será mostrado, utilizando as definições apresentadas no item 2.3 e também o comprimento disponível do equipamento para carregamento dos corpos de

prova, as dimensões adotadas para os corpos de prova. Os índices de esbeltez levam em consideração o comprimento efetivo e o menor raio de giração, será proposto analisar os dois índices de esbeltez, com isso existe a possibilidade de chegar as dimensões dos corpos de prova, utilizando a equação 25.

Como a NBR 7190, teve uma atualização no ano de 2022, a parte de verificação de estabilidade, passou a desconsiderar o índice de esbeltez e as suas três classificações, passando a considerar a esbeltez efetiva. A seção terá lados iguais, ou seja, uma seção quadrada, na tabela 17 é apresentado as dimensões dos corpos de prova.

Tabela 17 - Índices de esbeltez e dimensões para ensaio.

<b>Índices de esbeltez</b>			
<b>altura efetiva (cm)</b>		90	
<b>lado (cm)</b>	3	5	
<b>área (cm<sup>2</sup>)</b>	9	25	
<b>inércia (cm<sup>4</sup>)</b>	6,75	52,08	
<b>Índices de esbeltez</b>	103	62	

Fonte – Autoria própria.

### 3.3.2 Quantidade de corpos de prova

Serão confeccionados cinco corpos de prova para cada seção transversal adotada, essa quantidade permitirá uma análise estatística dos dados e poder ter a possibilidade de eliminar algum corpo de prova que apresente valores fora do comum.

### 3.3.3 Espécie de madeira

Na região de Alegrete, o tipo de madeira que se tem mais facilidade de encontrar-se é o “Eucalyptus Alba”, os valores médios dessa espécie descritos na NBR 7190/22 são provenientes de ensaios propostos.

Os valores médios para essa espécie de madeira, de acordo com a NBR 7190 são apresentados na tabela 18 (ABNT, 1997).

Tabela 18 - Valores médios Eucalyptus *Alba*.

<b>Nome comum (dicotiledôneas)</b>	<b>Nome científico</b>	<b><math>\rho_{ap}(12\%)</math> Kg/m<sup>3</sup></b>	<b><math>f_{c0}</math> MPa</b>	<b><math>f_{t0}</math> MPa</b>	<b><math>f_{t90}</math> MPa</b>	<b><math>f_v</math> MPa</b>	<b><math>E_{c0}</math> MPa</b>
<b>E. Alba</b>	Eucalyptus alba	705	47,3	69,4	4,6	9,5	13409

Fonte - NBR 7190 (1997, p.90).

### 3.3.4 Carga crítica para os corpos de provas propostos

Serão calculadas as cargas críticas para os corpos de provas propostos neste trabalho, para compara-los com os resultados ensaiados. Para NBR 7190 (ABNT, 2022) os valores de carga critica, serão representados pelos menores valores obtidos entre as equações 21, 22, 28 e 29. Para NBR 7190 (ABNT, 1997) os valores de carga critica, serão representados pelos menores valores obtidos entre as equações 23, 24 e 39.

## 4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Ensaios Preliminares

#### 4.1.1 Ensaios visuais de identificação

No item 3.31 foram definidas as dimensões dos corpos de prova, com isso, pode-se procurar o material para utilizar nos ensaios. A madeira utilizada neste trabalho, não tinha nenhum controle sobre sua origem ou tratamento, tanto que se observou nestes ensaios visuais, algumas anomalias nos corpos de provas, como mostrados nas imagens a seguir, a figura 20 mostra os corpos de prova que apresentam nós e a figura 21 mostra rachadura e mofo respectivamente.

Figura 20 – Identificação de defeitos nos corpos de prova.



Fonte – Autoria própria.

Figura 21 – Identificação de defeitos nos corpos de prova.



Fonte – Autoria própria.

#### 4.1.2 Umidade

Como a diferença de peso se tornou menor que 0,5% logo na segunda pesagem, o ensaio foi finalizado. Os dados recolhidos estão apresentados na tabela 19.

Tabela 19 - Ensaio de umidade

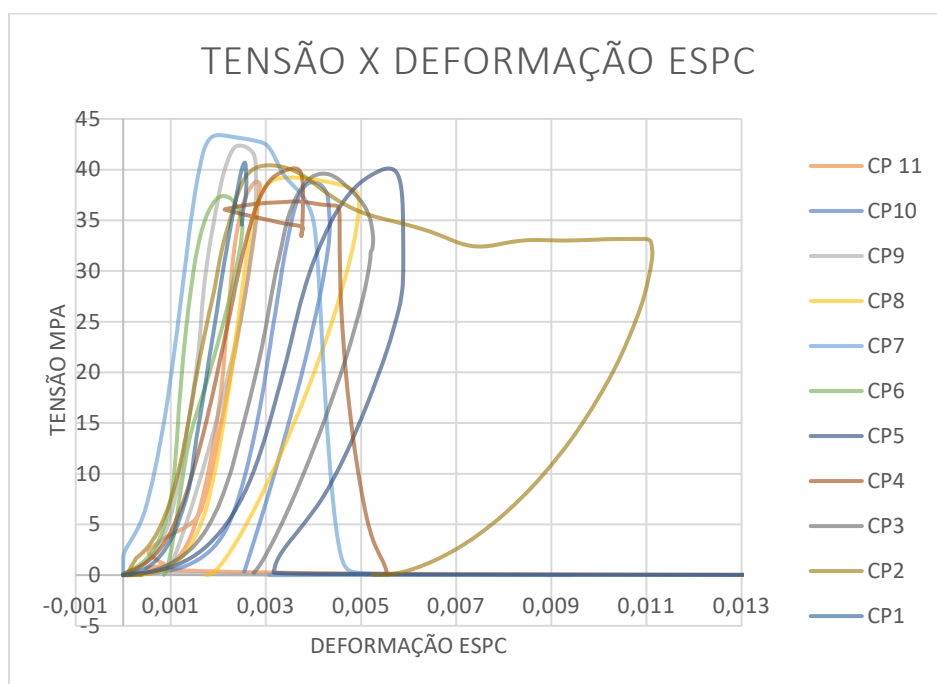
CP	HORARIO/ PESO (g)			U%	$(U-U_{med})^2$	$\sum(U-U_{med})^2$	Desvio	Erro		U% med
	17:00	10:00	17:00					Erro	%	
1	26,4	17	17	55,29	7,277					
2	26,4	17,4	17,4	51,72	0,761					
3	26	16,6	16,6	56,63	16,301					
4	25,8	18	18	43,33	85,794	144,11	4,24	1,50	2,85	52,59
5	26,9	17,4	17,4	54,6	4,030					
6	26,5	16,9	16,9	56,8	17,703					
7	26,4	17,7	17,7	49,15	11,851					
8	26,2	17,1	17,1	53,22	0,394					

Fonte – Autoria própria.

### 4.1.3 Módulo de Elasticidade e Resistência de Compressão paralela as fibras

Com o ensaio realizado, os dados foram coletados do software e passados para uma planilha de excel, gerados gráfico e destacados os valores necessários para o cálculo do módulo de elasticidade do tipo de madeira utilizada. O gráfico apresentado na figura 22 representa todos os gráficos de tensão por deformação específica dos ensaios, a figura 23 representa o oitavo corpo de prova com os valores retirados do gráfico para o cálculo do módulo de elasticidade utilizando a equação 2,

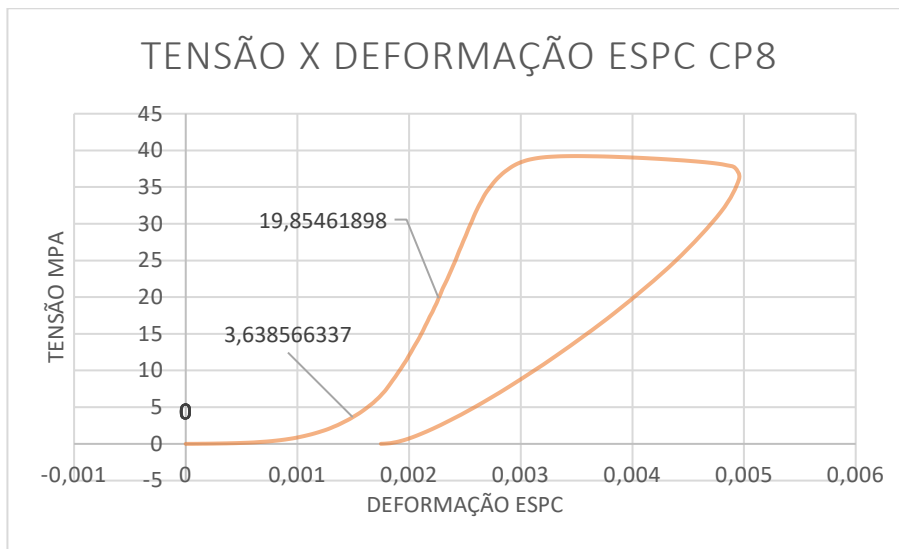
Figura 22 - Gráfico Tensão x deformação específica



Fonte – Autoria própria.



Figura 23 – Gráfico Tensão x deformação específica 8º CP



Fonte – Autoria própria.

Destacando os valores de 50% e 10% nos dados coletados e utilizando a equação 2, a tabela 20 mostra os valores de módulo de cada corpo de prova, desvio padrão, erro padrão e por último o módulo de elasticidade que será adotado para constituir os valores teóricos de carga crítica utilizando a NBR 7190/22.

Tabela 20 – Valores dos ensaios de compressão paralela as fibras.

CP	Fc0k (Mpa)	E (Mpa)	(E-Emed) <sup>2</sup>	Σ(E-Emed) <sup>2</sup>	Desvio	Erro	Erro (%)
1	40,68	7632,01	470342,7				
2	40,42	7253,7	94554,7				
3	39,60	4627,2	5377794,1				
4	40,13	5844,9	1212935,7				
5	40,11	3997,6	8694484,8				
6	37,39	10751,6	14480715,3	48499475	2099,8	633,1	9
7	43,41	10057,2	9678122,3				
8	39,23	6196,98	561334,1				
9	42,37	8660,9	2940177,6				
10	38,75	4731,7	4903962,5				
11	38,81	6654,6	85051,2				

Fonte – Autoria própria.

Como descrito no item 3.1.1.3, devemos fazer a correção destes valores de ensaio para a umidade ideal proposta pela NBR 7190 (12%), utilizando as equações 45 e 46 foram feitas essas correções e apresentadas na tabela 21:

Tabela 21 – Correção da umidade.

Ec0 (Mpa)	Fcok (Mpa)	Ec0U12% (Mpa)	Fc0kU12% (Mpa)
6946,2	40,11	8802,9	50,8

Fonte – Autoria própria.

#### **4.1.4 Valores teóricos de carga crítica de acordo com a NBR 7190/97 e NBR 7190/22**

Durante o processo de elaboração deste trabalho, a norma recebeu uma atualização, a versão antiga, tinha valores em forma de tabela, para o tipo de material escolhido para os ensaios. A versão nova, estes valores são obtidos através de ensaios propostos pela norma. A tabela 22, mostra as cargas críticas teóricas utilizando as NBR 7190/97 e NBR 7190/22 respectivamente.

Tabela 22 – cargas críticas teóricas.

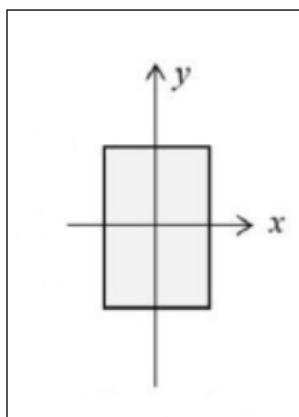
	Carga critica teórica			
	NBR 7190/97		NBR 7190/22	
Altura efetiva (cm)	90	90	90	90
Base (cm)	3	5	3	5
Área (cm <sup>2</sup> )	9	25	9	25
Inércia (cm <sup>4</sup> )	6,8	52,1	6,8	52,1
Kmod	0,88		1,1	
Índices de esbeltez	103,9	62,4	103,9	62,4
Esbeltez relativa	-		3,00	1,80
Fcok (Mpa)	47,3		50,8	
Fcok (kN/cm <sup>2</sup> )	4,73		5,1	
Fcod (kN/cm <sup>2</sup> )	2,97		3,99	
Ec0 (Mpa)	13409		8802,9	
E00,05 (Mpa)	-		6162,0	
E00,05 (kN/cm <sup>2</sup> )	-		616,2	
Ec0, ef (Mpa)	11799,92		-	
Carga critica (kN)	4,57	27,60	2,80	17,50

Fonte – Autoria própria.

## 4.2 Ensaios Principais

A figura 24 exemplifica os sentidos dos eixos propostos nos ensaios de compressão (x,y), para facilitar o entendimento dos dados.

Figura 24 – Eixos propostos.



Fonte – Autoria própria.

A tabela 23 indica os resultados experimentais das cargas críticas, com as dimensões propostas neste trabalho, também são indicados os valores de deslocamentos para os dois eixos propostos (x,y) e o sentido do deslocamento.

Tabela 23 - Ensaio principais.

CP	DIM (cm)	CARGA (KN)	DESLOCAMENTOS (mm)			
			Y	X	SENTIDO (Y)	SENTIDO (X)
1	3x3	16,15	0,55	2,02	↑	←
2		23,62	4,27	2,21	↓	→
3		13,32	9,84	2,70	↓	→
4		19,05	2,74	1,72	↑	→
5		17,37	5,87	3,14	↓	→
6		19,22	2,03	5,39	↑	→
1	5x5	67,57	1,43	7,45	↓	←
2		57,99	0,55	1,87	↓	←
3		78,86	3,62	3,23	↑	→
4		72,36	1,40	2,22	↑	→
5		68,26	1,67	1,06	↑	←
6		78,73	3,59	1,18	↑	→

Fonte – Autoria própria.

Com os resultados das cargas críticas utilizando as NBR7190/97 e NBR7190/22 e com os ensaios práticos, pode-se apresentar na tabela 24 os valores para que possamos compará-los e analisarmos melhor.

Tabela 24 – Comparativo entre os métodos aplicados.

Comparativo das cargas críticas.						
	NBR 7190/97		NBR 7190/22		EXPERIMENTAL	
Altura efetiva (cm)	90	90	90	90	90	90
Base (cm)	3	5	3	5	3	5
Área (cm <sup>2</sup> )	9	25	9	25	9	25
Carga critica $\gamma_f = 1,0$	4,57	27,60	2,80	17,50	-	-
carga critica $\gamma_f = 1,4$	6,4	38,6	3,9	24,5	18,12	70,63
<b>Comparativo teórico/experimental</b>						
<b>yefetivo</b>	35%	55%	22%	35%		
	2,8	1,8	4,6	2,9		

Fonte – Autoria própria.

Com os resultados das cargas críticas utilizando as NBR7190/97 e NBR7190/22 e com os ensaios práticos, pode-se observar que os ensaios práticos tiveram grande discrepância dos resultados teóricos.

Os valores teóricos, utilizando as NBR 7190/2022 e NBR 7190/1997, foram obtidos através das verificações propostas através da flexocompressão e estabilidade, nos dois casos os valores de carga crítica foram obtidos pela estabilidade. A falha ocorreu pela verificação na estabilidade, na parte de flexocompressão teve uma folga bem considerável.

Analisando os valores experimentais e teóricos, pode-se perceber que os valores experimentais se aproximam mais dos valores teóricos propostos pela NBR 7190/97. Em consideração a NBR 7190/22 podemos observar que ela apresenta valores mais conservadores.

Apenas para termos de comparação, os valores experimentais de 9 cm<sup>2</sup> e 25 cm<sup>2</sup> de área, representam 4 vezes mais carga e 2,5 vezes mais carga respectivamente, comparando com a NBR 7190/97. Comparando com a NBR 7190/22 esses valores são 6,5 vezes maiores e 4 vezes maiores respectivamente.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho era comparar de forma prática e teórica o comportamento de carga crítica em pilares de madeira em uma escala reduzida, porém no meio deste percurso houve uma revisão da norma, pode complementar um pouco essa ideia, proporcionando a comparação de resultados entre as revisões de norma.

Com a NBR7190/97 com a classificação simplificada, permitia usar os valores de classes de resistência através de tabelas, a NBR7190/22 nos apresenta tabelas com valores de classes de resistência, mas apenas se o material utilizado for de um lote homogêneo, indicando os ensaios caso contrário. Sobre a NBR7190/22, possibilitar valores de classes de resistência e nos encaminhar para caracterizar o material a ser utilizado, é bem interessante e nos coloca uma segurança maior ao projetar. Segundo NBR7190 “A classificação de um lote somente poderá ser feita por fornecedores que garantam, de acordo com a legislação Brasileira, a conformidade da resistência característica a compressão paralela as fibras do material” (ABNT, 2022). O material que foi utilizado, não tinha nenhuma certificação ou registro, assim como nenhum controle de qualidade e isso passa como normal em muitas regiões.

Podemos observar nos resultados obtidos de forma teórica, que nas duas revisões da norma, as equações propostas, as verificações por estabilidade foram cruciais para os resultados de carga crítica, deixando uma folga bem grande na parte de verificação quanto a flexocompressão.

Em relação aos resultados obtidos de forma prática, foram bem maiores que os teóricos, podendo ser provenientes do próprio ensaio, como erros de medição dos deslocamentos. Mas os valores recolhidos dos ensaios, não levaram em conta os coeficientes de minoração das propriedades da madeira, que reduziriam estes valores em 40%.

Certamente umas das maiores dificuldades encontradas neste trabalho, foi realizar os ensaios, desde ao erro de planejamento do aluno, quanto a equipamentos que ficaram indisponíveis durante os ensaios. Outro ponto que pode ser comentado, seria a elaboração de uma forma de controlar a posição de aplicação de carga, podendo gerar uma coleta de dados baseado em cargas aplicadas fora do centro, gerando excentricidade controlada.

Com o objetivo neste trabalho, pode nos apresentar valores diferentes entre os obtidos experimentalmente e os propostos pela NBR7190, claro que essa diferença de valores, pode ser oriunda tanto da não existência da procedência do material utilizado para os ensaios, como os problemas enfrentados durante o ensaio. Mas demonstra a importância de termos conhecimento das características do material a ser utilizado.

## REFERÊNCIAS

DEMARZO, Mauro Augusto *et al.* **Indicadores de Sustentabilidade (LCA) e Análise do Ciclo de Vida para Madeira de Reflorestamento na Construção Civil.** 21. ed. São Carlos: Revista Madeira Arquitetura & Engenharia, 2017. (8).

CHIES, D. **Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L.** 2005. 12f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MEIRELLES, C. R.; PALA, A. **Apostila de Processo construtivo em madeira,** 2010. p. 67.

MOTTA, J. P. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* L.f. proveniente do Vale do Rio Doce, Minas Gerais.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre -ES, 2011. p. 125.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de madeira:** NBR 7190. Rio de Janeiro, 2022.

F.P. Beer e E. R. Johnston Jr, **Resistência dos Materiais.** 3. ed. São Paulo: Editora Pearson Makron Books, c 1996.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais.** 7. ed. São Paulo: Editora Pearson Prentice Hall, 2010.

CARVALHAR, F. C. **Determinação experimental de carga de flambagem e da excentricidade acidental de pilares compostos de madeira.** 2001. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia de estruturas).

LIMA, N. W. B. **Ferramenta numérica para o estudo da flambagem de colunas**, Monografia (Bacharel em Ciência e Tecnologia) 2013.

DEIFELD, TELMO EGMAR CAMILO. **Aula 03 Madeiras tirantes e pilares**, 2016. Notas de aulas.