

**Previsão teórica da deflexão de uma peça fletida de madeira *Pouteria Pachycarpa Pires* através do princípio dos trabalhos virtuais, método dos deslocamentos e teorema de castigliano**

**Theoretical prediction of the deflection of a bent piece of wood *Pouteria Pachycarpa Pires* through principle of virtual, displacements method and works and Castigliano's theorem**

DOI:10.34115/basrv6n4-016

Recebimento dos originais: 14/04/2022

Aceitação para publicação: 30/06/2022

**Julianne Ferreira de Sá**

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)  
Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-00, Açailândia - MA  
E-mail: juliannesa.201762950@uemasul.edu.br

**Debora Emylle Carvalho Silva**

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)  
Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-00, Açailândia - MA  
E-mail: deborasilva.2017081394@uemasul.edu.br

**Mário Silva de Lucena**

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)  
Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-00, Açailândia - MA  
E-mail: mariolucena.2017081545@uemasul.edu.br

**Thalyta Souza Reis**

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)  
Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-00, Açailândia - MA  
E-mail: thalytareis.2017082730@uemasul.edu.br

**Ludson Lima Bandeira**

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)  
Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-00, Açailândia - MA  
E-mail: ludsonbandeira.201763170@uemasul.edu.br

**Pedro Manoel Lima Gustavo Sousa**

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-00,  
Açailândia – MA

E-mail: pedrosousa.2017081563@uemasul.edu.br

**João Miguel Santos Dias**

Mestre em Engenharia Ambiental Urbana pela Universidade Federal da Bahia (UFBA)

Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Endereço: Rua Topázio, Nº 100, Vila São Francisco, CEP: 65930-00,  
Açailândia - MA

E-mail: joao.dias@uemasul.edu.br

**RESUMO**

O Princípio dos Trabalhos Virtuais, Método dos Deslocamentos e o Teorema de Castigliano são formulações teóricas aplicáveis em materiais contínuos homogêneos e com comportamento elástico-linear e a madeira não apresenta tais características, dessa forma, pela ausência de modelos teóricos aplicáveis a madeira, tais formulações são utilizadas. Assim sendo, o objetivo deste trabalho é prever teoricamente as deflexões através da carga de ruptura de uma peça fletida de *Pouteria Pachycarpa Pires* e constatar experimentalmente os resultados obtidos. Deste modo, foi utilizado três corpos prova para o ensaio de compressão paralela às fibras, afim da caracterização mecânica da madeira *Pouteria Pachycarpa Pires*. Posteriormente, procedeu-se ao dimensionamento de uma viga para ser submetida a um ensaio de flexão em três pontos, através da metodologia de baixo custo, uma vez que com o aumento da carga ocasiona uma diferença entre os dados teóricos e experimentais. Portanto, é verificado que o desempenho mecânico das estruturas está garantido por conta das informações teóricas que consideram os valores de projeto das propriedades mecânicas da madeira.

**Palavras-chave:** princípios dos trabalhos virtuais, método dos deslocamentos, teorema de Castigliano, madeira, deflexão.

**ABSTRACT**

The Principle of Virtual Works, Displacement Method and Castigliano's Theorem are theoretical formulations applicable in homogeneous continuous materials with elastic-linear behavior and wood does not present such characteristics, thus, due to the absence of theoretical models applicable to wood, such formulations are used. Therefore, the objective of this work is to theoretically predict deflections through the rupture load of a bent part of *Pouteria Pachycarpa Pires* and to experimentally verify the results obtained. Thus, three specimens were used for the compression test parallel to the fibers, in order to mechanically characterize *Pouteria Pachycarpa Pires* wood. Subsequently, the load increased, since with the increase of the load a difference between the theoretical data and the experiments. Therefore, it is verified that the mechanical performance of the structures is guaranteed by the project because of the theoretical information that considers the values of the mechanical properties of the wood.

**Keywords:** principles of virtual works, displacement method and Castigliano theorem, wood, deflection.

## 1 INTRODUÇÃO

De forma a garantir a segurança nas estruturas é necessária a verificação para os Estados Limites que, segundo Filgueira (2017), são definidos como momentos no quais a estrutura não cumpre mais os requisitos necessários para um uso satisfatório e eficiente. Desta forma o Estado Limite de Serviço (ELS) está relacionado com a interrupção do uso normal da estrutura, devido à deterioração e danos que possam ocorrer na mesma (SALES et al., 2015). O Estado Limite Último (ELU) implica na paralisação, total ou parcial, do uso da estrutura.

Uma característica do ELU é o colapso da estrutura, ou seja, transformação da estrutura original em uma estrutura parcial ou totalmente hipostática provocada por plastificação. Assim sendo, para ELU é aplicável a condição da Equação 1, na qual os valores majorados das ações atuantes na estrutura não poderão ser ultrapassados pelos valores das resistências mecânicas dos materiais (valores minorados).

(Equação 1)

$$R_d < S_d$$

Onde:

$R_d$  é o valor de cálculo de resistência mecânica do material;

$S_d$  é o valor de cálculo da(s) ação(ões);

O valor de  $S_d$ , no caso de vigas, considera as tensões normais ( $\sigma$ ) e as tensões de cisalhamento ( $\tau$ ) atuantes. Estas deverão ser majoradas em função da norma de dimensionamento aplicável ao material empregue no elemento estrutural. As tensões normais são quantificadas através da fórmula da flexão (Equação 2), enquanto as tensões de cisalhamento podem ser calculadas através da (Equação 3).

As tensões normais aumentam com a distância em relação à linha neutra elástica que, para um comportamento elástico, esta é coincidente com o eixo principal de inércia perpendicular à direção do carregamento, no caso de flexão simples. As tensões de cisalhamento passarão a constituir um critério preponderante no dimensionamento, para um carregamento vertical, à medida que a largura da seção, medida perpendicularmente à direção do carregamento, diminui.

(Equação 2)

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot c$$

(Equação 3)

$$\tau = \frac{V S}{I t}$$

Onde:

$\sigma$  = Tensão normal (MPa);

M = Momento fletor (kN.mm);

I = Momento de Inércia (mm<sup>4</sup>);

c = Distância perpendicular ao eixo neutro (mm);

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (MPa);

V = Força de cisalhamento (kN);

S = Momento estático (mm);

t = Largura da área da seção transversal do elemento (mm).

Para ELS, Caldeirón (2017) ressalta a importância do cálculo dos deslocamentos para o dimensionamento de estruturas já que esses valores podem ultrapassar os limites admitidos pelas normas dos materiais. É possível prever o deslocamento sofrido pelos elementos estruturais por meio de teorias tais como: Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV), Teorema de Castigliano e Método dos Deslocamentos. O PTV consiste no equilíbrio dos esforços solicitantes em um corpo rígido, no qual ocorrerá um deslocamento virtual, quando as forças externas são iguais a zero (KASSIMALI, 2015). A formulação do PTV está apresentada na Equação 4.

O Teorema de Castigliano é aplicável em materiais que tenham comportamento elástico-linear. Este teorema consiste na derivada parcial de primeira ordem da energia de deformação do corpo para a força no ponto e na direção do deslocamento (HIBELLER, 2013), conforme é possível constatar na Equação 5. O conceito básico do Método dos Deslocamentos para análise de vigas e quadros é que o estado de uma barra é completamente definido pelos deslocamentos de seus nós, conforme a Equação 6 (MAU, 2015).

(Equação 4)

$$\delta = \int_l \frac{\bar{M}M}{EI} ds$$

(Equação 5)

$$\frac{U}{\partial d_i} = P_1$$

(Equação 6)

$$X_1 = - \frac{\delta_{10}}{\delta_{11}}$$

Onde:

$\delta$  = Deslocamento horizontal ou vertical (mm);

$\bar{M}$  = Momento virtual (kN.mm);

$M$  = Momento real (kN.mm);

$E$  = Módulo de elasticidade (MPa);

$I$  = Momento de Inércia (mm<sup>4</sup>);

$U$  = energia de deformação (J);

$\partial d_i$  = deformação (mm);

$P_1$  = carga axial (kN);

$X_1$  = incógnita hiperestática;

$\delta_{10}$  = deslocamento em determinado trecho da estrutura (mm);

$\delta_{11}$  = deslocamento em determinado trecho da estrutura (mm).

O interesse na construção com estruturas de madeira tem vindo a aumentar, sobretudo devido a pesquisas de novas tecnologias, como por exemplo: madeira lamelada cruzada colada (PEREIRA, et. al. 2019), sistemas construtivos *wood frame* (RIBASKI et al. 2017), ligações envolvendo aço e madeira (BULHÕES et al. 2020b; 2020c) e reaproveitamento de resíduos de madeira (BULHÕES et al. 2020a).

Dentre as características importantes a serem consideradas ao se utilizar a madeira está sua heterogeneidade, uma vez que possui diferentes tipos de células que desempenham funções específicas (FERRO, et al. 2015). A madeira também apresenta anisotropia quanto às propriedades físicas, visto que estão relacionadas com a disposição das suas fibras (LOGSDON, et al. 2014). Por outro lado, a madeira possui um comportamento higroscópico, que consiste na troca de moléculas de água com o meio circundante (PÁDUA, et al. 2021), o que afeta sua estabilidade dimensional e resistência mecânica. Medeiros Neto et al. (2016) ainda destacam a viscoelasticidade da madeira como responsável pela obtenção de módulos de elasticidade dinâmicos e estático distintos, sendo destacadas como desvantagens do seu uso (SANTOS, 2018).

O PTV, o Método dos Deslocamentos e o Teorema de Castigliano são empregados em materiais isotrópicos e homogêneos com comportamentos elástico-linear. No entanto, pela ausência de formulações teóricas aplicáveis à madeira, utilizam-se PTV, o Método dos Deslocamentos e o Teorema de Castigliano (VIDAURRE, 2013). Desse modo, o objetivo deste trabalho é prever teoricamente deflexões e a carga de ruptura de uma peça fletida de madeira de *Pouteria Pachycarpa Pires* em constatar experimentalmente os resultados obtidos.

## 2 METODOLOGIA

Na cidade de Açailândia – MA, é frequente encontrar elementos estruturais fletidos de madeira de *Pouteria Pachycarpa Pires*. Esta madeira possui o cerne e alburno idênticos por obterem as cores, amarelo-pálido, com seu brilho moderado, predominância de cheiro e gosto imperceptíveis, densidade alta e apresenta moderada resistência ao corte e a textura fina tendo como característica seu fácil processamento (IPT, 2002).

Desta forma, foi adquirida uma peça de madeira 6 cm de altura por 20 cm de largura por 750 cm de comprimento. A partir desta peça, foram obtidos 3 corpos de prova (CPs) com dimensões de (5,0 x 5,0 x 15,0) cm<sup>3</sup>, para serem submetidos ao ensaio de compressão paralela às fibras (Figura 1), conforme a norma ABNT NBR 7190-3:2022-*Métodos de ensaio para corpo de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas*.

Figura 1- Ensaio de compressão paralela às fibras.

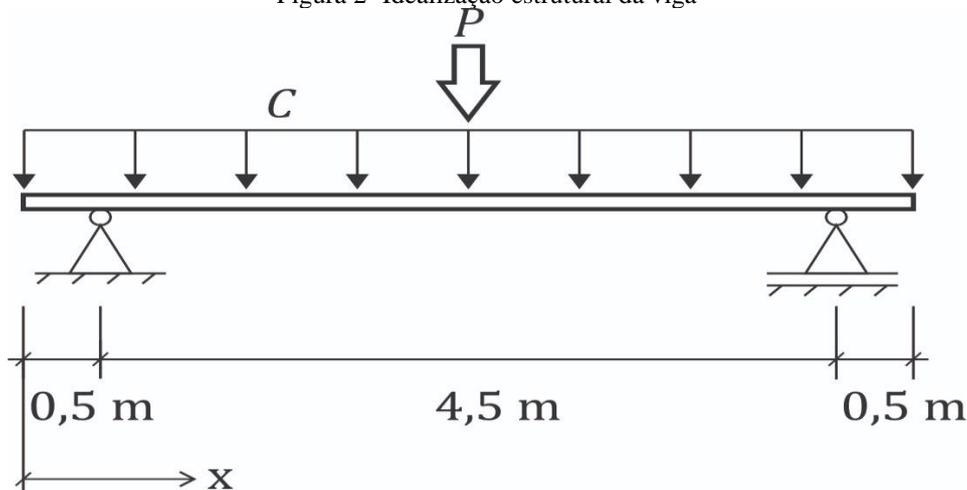


Fonte: Autores.

Com base nos resultados obtidos, foi realizado o dimensionamento de uma viga através da fórmula da flexão (Equação 2), considerando os valores apresentados em IPT (2022) para a resistência à compressão paralela às fibras. Na flexão, as peças fletidas com seção quadrada e largura maior do que a altura, apresentam o seu comportamento crítico para tensões normais de compressão devidas ao momento fletor. Desta forma, obteve-se uma peça com dimensões (4,4 x 4,4 x 550,0) cm<sup>3</sup>, apoiada em pontos separados de 450,0 cm entre si. Assim sendo, a razão entre o comprimento do vão livre (L) e a altura da seção (h) foi de 102,27. Icimoto, et al. (2015) referem que a relação entre o comprimento (L) e a altura (h) deverá ser superior a 21, de forma a que não ocorram influências dos deslocamentos de cisalhamento não são significativas na deflexão total.

Após o dimensionamento da viga, procedeu-se à previsão das deflexões para os carregamentos de 20, 40, 60 kgf, recorrendo às formulações teóricas advindas do PTV (Equação 4), Teorema de Castigliano (Equação 5) e Método dos Deslocamento (Equação 6), considerando a seção transversal da peça, o módulo de elasticidade da madeira utilizada e a idealização apresentada na Figura 2.

Figura 2- Idealização estrutural da viga



Fonte: Autores

Para constatar a consistência dos resultados obtidos pelas formulações teóricas, procedeu-se ao ensaio não destrutivo de flexão estática em três pontos da viga de madeira de *Pouteria Pachycarpa Pires*. O ensaio foi realizado na Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, *campus* Açailândia recorrendo a um aparato de ensaio de baixo custo, constituído por dois apoios de madeira de *corymbia citriodora* (oferecidos pela Venturoli), com dimensões de (30x15) cm<sup>2</sup> de seção transversal e 60 cm de comprimento. As peças de *Corymbia citriodora* foram coladas entre si com epóxi bi-

componente Compound Tix (oferecido pela Vedacit). No topo dos apoios, foram utilizados CPs de concreto cilíndricos, com 15 cm de diâmetro por 30 cm de comprimento (Figura 3).

Figura 3- CPs de concreto cilíndricos.



Fonte: Autores

Para permitir a aplicação do carregamento no CP de flexão, através da utilização de pesos de academia, foram utilizadas cruces compostas por duas barras nervuradas de 16 mm de diâmetro, fixadas e através de duas abraçadeiras metálicas, formando um ângulo de  $90^\circ$  entre si. Com a finalidade de manter os pesos em equilíbrio, foi necessário dobrar as barras em um ângulo de  $45^\circ$ . Na superfície superior do CP, foi introduzido um cilindro metálico, de forma a transmitir o carregamento de forma uniforme na seção transversal (Figura 4). Para conectar o cilindro e as cruces, foi utilizado um cabo de aço de 6,35 mm, fixo com esticadores metálicos (Figura5).

Figura 4 – Cilindro metálico



Fonte: Autores.

Figura 5 – Esticadores metálicos com cabos de aço presos as cruzes.



Fonte: Autores

Após cada carregamento (20, 40, 60 kgf) foi realizada a medição das deflexões, com o recurso a uma trena metálica e uma linha de nylon que fora previamente fixada no topo do conjunto dos apoios formados por madeira *corymbia citriodora* e CPs de concreto. Posteriormente, os resultados experimentais foram comparados com os valores obtidos a partir das formulações teóricas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão paralela às fibras dos CPs de *Pouteria Pachycarpa Pires*. Conforme supracitado, este ensaio serviu para verificação da veracidade da informação fornecida pelo vendedor da madeira que, neste caso, apresentou um valor médio de 74,86 MPa e um Coeficiente de Variação de 1,45%.

Tabela 1 - Resultados do ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.

Nº CP	$f_{c0}$ (MPa)	Média (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
1	75,18	74,86	1,45
2	73,65		
3	75,76		

Nº CP: número do corpo de prova,  $f_{c0}$ : resistência a compressão paralela às fibras. Fonte: Os autores.

Arroyo et al. (2022) investigaram a influência do teor de umidade nas propriedades físicas e mecânicas de *Pouteria Pachycarpa Pires*, tendo obtido um valor médio de resistência à compressão paralela às fibras, para a referência de 12%, igual a

58,82 MPa. Araújo (2007), apresenta um valor de 74,04 MPa para a resistência à compressão paralela às fibras desta madeira. Conforme as informações presentes em IPT (2022), o valor médio da resistência à compressão paralela às fibras da *Pouteria Pachycarpa Pires*, para um teor de umidade de 12%, é de 74,0 MPa. Comparando os resultados deste trabalho, é possível verificar que o valor médio obtido é 27,18% superior ao resultado de Arroyo et al. (2022), 1,11% superior ao valor de Araújo (2007) e 1,16% maior que o valor de IPT (2022).

Conforme o item 4.3 da norma ABNT NBR 7190-3:2022, uma vez que o Coeficiente de Variação é inferior a 18%, é possível admitir que estamos perante um lote homogêneo e os resultados obtidos são representativos, não havendo uma dispersão de resultados considerável. Desta forma, por comparação com os resultados presentes na bibliografia, admite-se que a madeira em questão poderá ser da espécie *Pouteria Pachycarpa Pires*.

Com o valor médio da resistência à compressão paralela às fibras, o dimensionamento da viga foi realizado através das disposições normativas presentes na ABNT NBR 7190-1:2022- *Critérios de dimensionamento*, considerando as piores condições de serviço (para peças não submersas) para a determinação dos valores de  $k_{mod}$  ( $k_{mod1} = 0,6$ ,  $k_{mod2} = 0,8$  e  $k_{mod3} = 0,8$ ). Desta forma, o valor de cálculo para a resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{cod}$ ) foi igual a 143,7 daN/cm<sup>2</sup>.

Não dispondo de equipamentos que permitissem obter o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, adotou-se o valor indicado por IPT (2022), uma vez que a resistência à compressão paralela às fibras média desta referência (74,0 MPa) foi semelhante ao resultado obtido na Tabela 1. Consequentemente, considerando os mesmos valores de  $k_{mod}$  adotados para  $f_{cod}$ , resultando num valor de cálculo ( $E_{c,ef}$ ) igual a 62887,68 daN/cm<sup>2</sup>. De posse dos valores de  $f_{cod}$  e  $E_{c,ef}$  e recorrendo às Equações 2 e 3, foi obtida uma seção transversal de (4,4 x 4,4) cm<sup>2</sup> para as vigas, sendo que estas apresentaram comprimentos totais de 550 cm, sendo seu vão livre de 450 cm.

A Tabela 2 apresenta os resultados experimentais – para cada carregamento – da deflexão obtida experimentalmente ( $\delta_{exp.}$ ) e as deflexões calculadas através do PTV ( $\delta_{PTV}$ ), Teorema de Castigliano ( $\delta_{Castigl.}$ ) e Método dos Deslocamentos ( $\delta_{desloc.}$ ). É possível verificar que todos os resultados de deflexão aumentam em função do carregamento aplicado. O Teorema de Castigliano apresenta os maiores resultados para a deflexão, quando comparado com os demais valores obtidos através das formulações

teóricas. Já os menores valores foram obtidos pelo PTV à exceção do resultado referente à carga de 20 kgf, onde o Método dos Deslocamentos apresentou o menor valor.

Tabela 2 – Deflexões experimental e teóricas para a viga em estudo.

Carga (kgf)	$\delta_{exp.}$ (cm)	$\delta_{PTV}$ (cm)	$\delta_{Castigl.}$ (cm)	$\delta_{Desloc}$ (cm)
20	4,9	7,2792	7,2816	7,2776
40	10,9	14,5543	14,5633	14,5551
60	17,1	21,8357	21,8450	21,8360

$\delta_{exp.}$ : deflexão obtida experimentalmente,  $\delta_{PTV}$ : deflexão obtida teoricamente através do método do princípio do trabalho virtual,  $\delta_{Castigl.}$ : deflexão obtida teoricamente através do método de Castigliano,  $\delta_{Desloc.}$ : deflexão obtida teoricamente através do método do deslocamento. Fonte: Autores.

A Tabela 3 mostra as diferenças entre os valores obtidos para a deflexão através do ensaio experimental e segundo as formulações numéricas. É possível verificar que a menor diferença entre a previsão teórica e o resultado experimental foi de 2,377 cm (Método dos Deslocamentos para a carga de 20 kgf), sendo que a maior diferença foi de 4,745 cm (Teorema de Castigliano para a carga de 60 kgf).

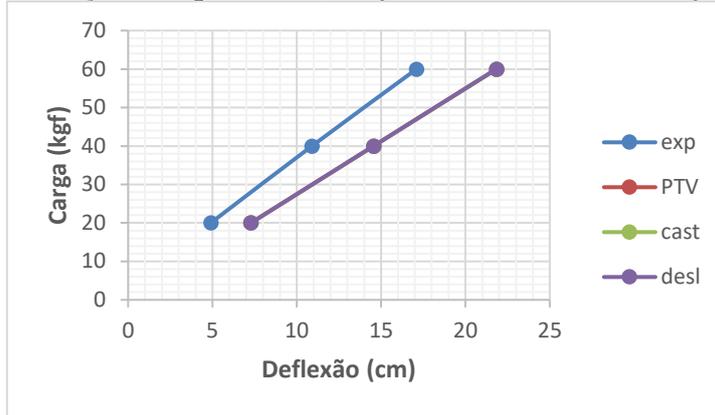
Tabela 3 – Diferença entre a deflexão experimental e as deflexões teóricas.

Método	Carga (kgf)	$\delta_{teórico} - \delta_{exp.}$ (cm)	$\Delta\delta$ (cm)
PTV	20	2,3792	7,2792
	40	3,6543	7,2751
	60	4,7357	7,2814
Castigliano	20	2,3816	7,2816
	40	3,6633	7,2817
	60	4,7450	7,2817
Deslocamentos	20	2,3776	7,2776
	40	3,6551	7,2775
	60	4,7360	7,2809

**PTV**: Princípios dos Trabalhos Virtuais;  $\delta_{exp.}$ : deflexão obtida experimentalmente;  $\delta_{teórico}$ : deflexão obtida teoricamente;  $\Delta\delta$ : diferença de deslocamento entre duas deflexões consecutivas. Fonte: Autores.

Todas as diferenças entre as formulações teóricas e os resultados experimentais aumentam como consequência do incremento do carregamento. O Figura 6 evidencia a divergência entre os resultados em função do acréscimo de carga. Todas as formulações teóricas apresentam resultados entre si que divergem em valores na ordem de décimas de milímetros.

Figura 6- Relação da carga-deflexão, comparando os teóricos com o experimental



exp.: experimental, PTV: Princípio dos Trabalhos Virtuais, cast: Teorema de Castigliano, desl: Teorema dos Deslocamentos. Fonte: Autores.

O fato de os valores de deflexão experimentais serem menores do que os resultados obtidos por via teórica (PTV, Teorema de Castigliano e Método dos Deslocamentos), demonstram que os coeficientes utilizados para minorar o valor médio do módulo de elasticidade à compressão, obtido através de IPT (2022), garantem a segurança relativamente aos ELS, no que concerne às deformações excessivas. Por outro lado, apesar do módulo de elasticidade da peça ensaiada não ter sido determinado, é possível admitir que este é superior ao valor de projeto ( $E_{c,ef}$ ) determinado sob as condições supracitadas.

Analisando a Tabela 3 e o Gráfico 1, é possível verificar que as diferenças entre os resultados teóricos e os valores obtidos experimentalmente aumentam em função do acréscimo de carga. Isto revela que as formulações teóricas são mais conservadoras para maiores carregamentos, o que beneficia a segurança das estruturas, no entanto não consiste num dimensionamento econômico. Por outro lado, a Tabela 4 revela que existe um aumento da diferença entre resultados de deflexão obtida experimentalmente, o que revela que o comportamento da viga não foi elástico-linear, no entanto as formulações teóricas (Equações 4, 5 e 6) apresentam um comportamento mecânico por elas obtido é linear-elástico.

Tabela 4 - Diferenças entre deslocamentos de um mesmo método

Comparação	Carga (kgf)	$\delta_{exp.}$ (cm)	$\delta_{teórico}$ (cm)	$\Delta\delta$ (cm)
$\delta_{exp.}/\delta_{PTV}$	20	4,9	7,2792	4,9
	40	10,9	14,5543	6
	60	17,1	21,8357	6,2
$\delta_{exp.}/\delta_{Castigl.}$	20	4,9	7,2816	4,9
	40	10,9	14,5633	6
	60	17,1	21,845	6,2

---

	20	4,9	7,2776	4,9
$\delta_{exp.}/\delta_{Desloc}$	40	10,9	14,5551	6
	60	17,1	21,836	6,2

---

$\delta_{exp.}$ : deflexão obtida experimentalmente,  $\delta_{PTV}$ : deflexão obtida teoricamente através do método do princípio do trabalho virtual,  $\delta_{Castigl.}$ : deflexão obtida teoricamente através do método de Castigliano,  $\delta_{Desloc.}$ : deflexão obtida teoricamente através do método do deslocamento;  $\Delta\delta$ : diferença de deslocamento entre duas deflexões consecutivas Fonte: Autores.

As divergências entre resultados teóricos são na ordem de centésimas de milímetros, sendo, portanto, de uma ordem de grandeza que poderá ser considerada desprezável, quando comparadas com os valores apresentados pela Tabela 3. Sendo assim, uma vez que os resultados obtidos através das formulações teóricas estão acima dos valores experimentais, o dimensionamento estrutural baseado na equação 2, para garantir o desempenho mecânico da estrutura perante os critérios de deflexão dos ELS.

#### 4 CONCLUSÃO

As previsões teóricas forneceram resultados superiores às deflexões obtidas experimentalmente, sendo que as diferenças obtidas entre estes valores variaram entre 4,745 cm e 2,3775 cm. uma vez que o aumento da carga ocasiona a diferença entre os dados teóricos e experimentais. Essas diferenças entre resultados teóricos e experimentais aumentam em função do incremento do carregamento, indicando que o comportamento da viga não foi elástico-linear, sendo que as formulações teóricas apresentam um comportamento linear-elástico.

#### AGRADECIMENTOS

À empresa Impermix por gentilmente ceder a máquina utilizada no ensaio de compressão paralela às fibras, à Vedacit pela cedência da cola epóxi bi-componente Compound Tix e à Venturoli pela confecção dos apoios de madeira de *corymbia citriodora*.

## REFERÊNCIAS

Araújo, H. J. B. “Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras.” **Revista Floresta**, v. 37, n. 3, Curitiba - PR, 2007.

Arroyo, F. N.; Fraga, I. F.; Soares, L. S. Z. R.; Aquino, V. B. de M.; Mascarenhas, F. J. R.; Santos, H. F.; Christoforo, A. L.; Lahr, F. A. R. “Influence of Moisture on Physical and Mechanical Properties of *Pouteria Pachycarpa* Wood.” **Floresta e Ambiente**, v. 29, n. 2, 2022.

Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7190-1:2022 – *Projeto de Estruturas de Madeira. Parte 1- Critérios de dimensionamento*. Rio de Janeiro. 2022.

Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7190-3:2022 – *Projeto de Estruturas de Madeira. Parte 3- Métodos de ensaio para corpo de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas*. Rio de Janeiro. 2022.

Bulhões, M. S.; Dias, J. M. S.; Cunha, R. D A.; César, S. F. “Estudo dos efeitos da acetilação na proliferação de fungos em Compósitos de serragem de eucalipto e borracha natural.” **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 6, p. 3386-3394, nov./dez. 2020a.

Bulhões, M. S.; Dias, J. M. S.; Cunha, R. D A.; César, S. F. “Influência da densidade básica de madeiras em furações para ligações coladas com barras de aço.” **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 6, p. 3395-3405, nov./dez. 2020b.

Bulhões, M. S.; Dias, J. M. S.; Cunha, R. D A.; César, S. F. “Influência dos defeitos de execução e da madeira na resistência mecânica de ligações coladas com barras de aço.” **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 6, p. 3406-3416, nov./dez. 2020c.

Ferro, F. S.; Icimoto, F. H.; Almeida, D. H.; Christoforo, A. L.; Lahr, F. A. R. “Influência da posição dos instrumentos de medida na determinação do módulo de elasticidade da madeira na compressão paralela às fibras ( $E_{cod}$ )”. **Revista Árvore** [online]. V. 39, n., pp. 743-749. 2015.

Hibbeler, R. C. “Resistência dos materiais.” 7. ed. São Paulo: Pearson Education: Prentice-Hall, 2010.

Icimoto, F. H.; Ferro, F. S.; Almeida, D. H.; Christoforo, A. L.; Lahr, F. A. R. “Influence of specimen orientation on determination of elasticity in static bending.” *Maderas. Ciencia y Tecnología*. 2015.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). “Madeiras da Amazônia, características e utilizações: Amazônia Oriental.” Vol. 3. Brasília: IBAMA, 1997. 141 p.

IPT. Site do IPT, 2022. Instituto de pesquisas tecnológicas. Disponível em: <[http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/36-goiabao.htm](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/36-goiabao.htm)>. Acesso em: 23 jun. 2022.

*Kassimali*, A. “Análise estrutural.” Tradução. 5ª edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

Lara, E. R.; Tomeleri, J. O.; Aguirre, S. L. T.; Silva, D. A.; Yamaji, Fábio Minoru.; Pádua, F. A. de. “Estimativa da umidade de equilíbrio da madeira para o município de Sorocaba - SP”. In: IV Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 2019, Santarém. Anais do IV Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 2019.

Logsdon, N. B.; Finger, Z.; Jesus, J. M. H. “Influência do ângulo entre o esforço aplicado e a direção das fibras da madeira sobre a resistência ao cisalhamento”. **Ciência Florestal** [online]. v. 24, n. 4, pp. 969-978. 2014.

Mau, S. T.; “Introdução à Análise Estrutural – Métodos dos Deslocamentos e das Forças”. Editora Ciência Moderna Ltda., 2015.

Neto, P. N. de M.; Paes, J. B.; da S. Silva, J. G. M. “Efeito do teor de umidade na determinação do módulo de elasticidade da madeira por técnica não destrutiva”. **Scientia Forestalis**. v. 44, n. 112, p. 917-924, dezembro, 2016.

Pereira, M, C, M.; Junior, C, C. “Strength and Stiffness of Cross Laminated Timber (CLT) panels produced with Pinus and Eucalyptus: experimental and analytical comparisons”. **Matéria**. v. 24, n. 2. 2019.

Ribaski, N. G.; Dudek, L. C.; Rotta, C. E. “O sistema wood frame e o setor madeireiro paranaense”. **Brazilian Applied Science Review**, v. 1, n. 2, p. 35-42, junho, 2017.

Sales, J. J.; Munaiar, J.; Malite, M. “Segurança nas Estruturas”. 2. ed. São Carlos: Elsevier, 2015.

Santos, L. M. A. dos M. “Revista Científica Semana Acadêmica.” Fortaleza, ano MMXVIII, Nº. 000131, setembro, 2018.

SENTANO, B. S.; REAL, M. de V.; ISOLDI, L. A.; BAPTISTA, L. G. Simulação numérica do comportamento não-linear de placas planas com perfurações quadradas sob compressão uniaxial em estruturas navais e offshore. **Scientia Plena**, [S. l.], v. 11, n. 8, 2015.