



2023

COMPARAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE DA MADEIRA PEROBA DO NORTE NA FLEXÃO DE PEÇAS ESTRUTURAIS E NA COMPRESSÃO EM CORPOS DE PROVA

Custódia Anttonia Bispo Pereira ^a; Christiane Areias Trindade ^b

^a Aluno de Graduação em Engenharia Civil, custodia.anttonia@ufms.br

^b Professor Orientador, Doutora em Engenharia Civil, christiane.trindade@ufms.br

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

RESUMO

No Brasil, a norma vigente para o projeto de estruturas é a NBR 7190 (ABNT, 2022), que passou por uma recente atualização e com mudanças nas premissas e procedimentos de cálculo. Uma das alterações é o sistema de classificação das espécies de madeira, que consequentemente, altera a definição das propriedades físicas e mecânicas, especialmente do módulo de elasticidade. A normativa especifica a utilização do valor do módulo de elasticidade obtido em ensaios de flexão de peças estruturais, mas permite utilizar a classificação da madeira por meio de ensaios em corpos de prova, e nesse caso, deve-se considerar a igualdade entre o módulo extraído do corpo de prova de pequenas dimensões e isento de defeitos, e o obtido por meio de ensaio da peça de dimensões estruturais. Essa equivalência leva valores distintos a serem tratados como valores iguais, afetando diretamente o projeto estrutural. Deste modo, esse estudo busca averiguar se essa igualdade entre os valores médios dos módulos de elasticidade é assertiva ao realizar ensaios de compressão paralela às fibras em corpos de prova isentos de defeitos e flexão de peças estruturais, utilizando como objeto de estudo a espécie Peroba do Norte (*Goupia glabra*), também denominada como Cupiúba e com classe de resistência D40 do grupo de folhosas. A partir dos resultados dos ensaios realizados, concluiu-se por meio de analogias das propriedades de resistência e rigidez que é válido utilizar essa equivalência do valor médio do módulo de elasticidade.

Palavras-chave: Módulo de elasticidade; *Goupia glabra*; Estruturas de madeira.

ABSTRACT

In Brazil, the current standard for the design of structures is NBR 7190 (ABNT, 2022), which has been recently updated and has changed assumptions and calculation procedures. One of the changes is the classification system of wood species, which consequently changes the definition of physical and mechanical properties, especially the modulus of elasticity. The regulation specifies the use of the modulus of elasticity value obtained in bending tests on structural parts, but allows the use of wood classification through tests on specimens, and in this case, one must consider the equality between the extracted modulus of the specimen of small dimensions and free of defects, and that obtained by means of testing the piece with structural dimensions. This equivalence causes different values to be treated as equal values, directly affecting the structural project. Thus, this study seeks to ascertain whether this equality between the average values of the modulus of elasticity is assertive when carrying out compression tests parallel to the fibers in test specimens free of defect and flexion of structural parts, using the species as object of study Peroba do Norte (*Goupia glabra*), also known as Cupiúba and with resistance class D40 from the broadleaf group. With this, it was proved through analogies of the strength and stiffness properties that it is valid to use this equivalence of the average value of the modulus of elasticity.

Keywords: Modulus of elasticity; *Goupia glabra*; Wooden structures.

1. INTRODUÇÃO

A madeira possui virtudes que a tornam um material em destaque devido às propriedades particulares, entre elas ao ser renovável, versátil e possuir excelentes propriedades mecânicas, sendo assim

utilizada com diversas finalidades na construção civil: estrutural, permanentes ou temporárias, em elementos construtivos, tais como paredes, pisos, portas e janelas, e até como elemento decorativo. Segundo Calil et al. (2019), o cenário mundial é dado pela globalização econômica e com isso, o Brasil buscou novas oportunidades de atividade

econômica por meio da esfera do setor florestal. Associado à essa ideia financeira, Oliveira (1997) sintetizou que essa realidade pode auxiliar a atividade econômica com a qualidade de vida devido à sustentabilidade que esse material proporciona, ao favorecer a manutenção do equilíbrio do meio ambiente.

Em geral, para um dimensionamento eficiente de uma estrutura, faz-se necessário o conhecimento do módulo de elasticidade. Para Christoforo et al. (2013), a madeira em particular possui riscos na obtenção precisa de propriedades elásticas devido à sua natureza orgânica, por se tratar de um material com grande complexidade e variabilidade anatômica ao manifestar três eixos de simetria, sendo eles o radial, tangencial e longitudinal.

Para tanto, Zangiácomo et al. (2013) se fundamenta na literatura baseada nos ensaios segundo a NBR 7190 sob aspecto de estudo da madeira *Pinus elliottii* e demonstra que o módulo de elasticidade em corpos de prova isento de defeitos é maior que o módulo de elasticidade obtido de peças estruturais e que essa diferença ocorre devido aos “defeitos” (nós de crescimento de galhos e desvios de fibra) que estão presentes nas peças estruturais, e não estão presentes nos corpos de prova de pequenas dimensões. O autor ressalta que dessa maneira, o dimensionamento pode se tornar impreciso e inseguro.

A Associação Normativa Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) atualizou recentemente a norma para Projeto de estruturas de madeira, a NBR 7190 (ABNT, 2022) e com isso, houve uma nova categorização das classes de madeira que interfere diretamente nas propriedades físicas e mecânicas das espécies, entre elas o módulo de elasticidade. Essa propriedade possui grande relevância no dimensionamento estrutural, pois quando superestimada provoca um subdimensionamento e vai contra às condições de segurança estabelecidas.

Para o cálculo dos estados limites últimos e estados limites de serviço, a norma especifica o uso do módulo de elasticidade que pode ser obtido por meio de peças estruturais ou mesmo em corpos de prova, através de ensaios definidos pela mesma norma, e estabelece que o módulo de elasticidade de ambos deve ser considerado igual. Entretanto, a própria NBR 7190-1 (ABNT, 2022) também apresenta valores dos dois módulos de elasticidade para as diversas classes de madeira em duas tabelas distintas, e, aparentemente, os valores são diferentes.

Portanto, indaga-se: é possível afirmar que o módulo de elasticidade de peças estruturais é equivalente ao

módulo de elasticidade de corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos?

Então, a presente pesquisa utiliza como objeto de estudo a madeira Peroba do Norte e possui como objetivo geral a verificação se há igualdade entre o módulo de elasticidade obtido por meio do ensaio de compressão paralela às fibras em corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos, e o módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão de peças estruturais.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para dar suporte à abordagem laboratorial, a seguir serão expostas pesquisas que envolvem a madeira Peroba do Norte (*Goupia glabra*) e estudos que compreendem as propriedades físicas e mecânicas dessa madeira.

2.1. Madeira Peroba do Norte

Conforme a NBR 7190-1 (ABNT, 2022), é classificada como dicotiledônea e se enquadra na classe de resistência D40. As dicotiledôneas, denominadas comumente como folhosas, fazem parte do grupo das angiospermas, e as árvores pertencentes a esse grupo, com interesse para a engenharia, são, em sua maioria, madeiras nativas, ou seja, são provenientes de florestas naturais das regiões brasileiras e que não foram plantadas pelo homem. Assim como a Peroba do Norte, fazem parte do grupo das dicotiledôneas: Angelim, Angico, Jatobá, Ipê, Itaúba, entre outras.

À medida que a normativa concede a nomenclatura de Cupiúba (*Goupia glabra*), também pode ser conhecida popularmente por outros nomes de acordo com Camargos (2001, apud EMBRAPA, 2015) conforme o local de ocasião, tais como: bragantina, cachaceiro, copiúba, copiúva, cupiúba, cupiúba-rosa, cupuba, cutiúba, peniqueiro, peroba-do-norte, peroba fedida, tento. Segundo IPT (2013), é uma madeira nativa da região norte do Brasil (Amazônia brasileira) e está presente nos estados da Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia. Em outros países, IPT (2009) afirma a ocorrência nos territórios da Colômbia, Guiana, Guiana Francesa, Suriname e Venezuela.

É considerada como uma madeira pesada e dura, e entre suas características gerais, é dado destaque ao seu odor desagradável e notório quando fresca, no entanto, ao realizar uma secagem adequada, esse cheiro é assegurado. De acordo com o IPT (2013),

seu cerne e alburno são avermelhados e configurados de maneira uniforme, além de apresentar uma grã irregular, textura média e superfície sem brilho.

No âmbito da durabilidade, a Peroba do Norte possui alta resistência à agressão de organismos xilógrafos (fungos e cupins) (IPT, 1989 apud IPT, 2009), especificamente aos fungos apodrecedores (podridão branca e parda) e cupins-de-madeira-seca, mas a espécie não apresenta o mesmo desempenho aos xilógrafos marinhos (CHUDNOFF, 1979; IBAMA, 1997 apud IPT, 2009). Para fins de tratamentos, o cerne e o alburno exibem permeabilidade parciais perante soluções preservativas de oleossolúvel (creosoto) e hidrossolúvel (CCA), sendo a retenção do primeiro por volta de 200 kg/m³ a 300 kg/m³ (IPT, 2009).

A madeira de estudo apresenta fácil trabalhabilidade com ferramentas manuais ou máquinas devido à disposição para serrar, aplainar, torneiar, colar e parafusar (IPT, 2013). Além disso, demonstra boa receptividade de tinta, verniz, emassamento e polimento (IBAMA, 1997 apud IPT, 2009) e o seu processo de secagem ao ar livre é lenta, sem a presença de defeitos significativos como rachaduras ou empenamentos, mas em estufas podem ocorrer singelas incidências de defeitos conforme Jankowsky apud IPT (2009). Em estudos realizados pela Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM/IPT, 1981 apud IPT, 2009), afirma-se que a durabilidade da Peroba do Norte seja superior a 12 anos em contato com o solo.

Com isso, é possível determinar suas propriedades físicas e mecânicas a partir de resultados obtidos em conformidade com a NBR 6230/85 (IPT, 2009), na qual as tabelas 1 e 2 a seguir mostram esses valores.

Tabela 1 – Propriedades físicas. Fonte: Adaptado (IPT, 2009)

Densidade de massa (kg/m ³)	15% de umidade	
	Básica	870
Contração (%)	Radial	710
	Tangencial	4,8
		9,1
	Volumétrica	16,1

Tabela 2 – Propriedades mecânicas. Fonte: Adaptado (IPT, 2009)

Propriedades		Madeira verde	Madeira a 15% de umidade
Compressão paralela às fibras (MPa)	Resistência	50,8	67,2
	Módulo de elasticidade	17142	-
	Limite de proporcionalidade	32,4	-
Flexão (MPa)	Resistência	96,70	122,1
	Módulo de elasticidade	13690	-
	Limite de proporcionalidade	46,5	-

Como complementares, pode-se citar outras propriedades como a resistência ao impacto na flexão para madeiras a 15% um trabalho absorvido de 29,5 J, a dureza Janka para madeira verde de 6266 N, a tração normal às fibras para madeira verde de 6,8 MPa e o fendilhamento da madeira verde de 0,9 MPa (IPT, 2009).

De acordo com estudos da Peroba do Norte, Baena (2015) encontra como valor médio da resistência à compressão paralela às fibras 56,3 MPa e o valor característico da resistência à compressão 45,60 MPa. Para Almeida (2014), entre as propriedades mecânicas obtidas, o valor médio para a resistência à compressão paralelas às fibras é de 44,5 MPa e o valor médio do módulo de elasticidade na compressão é de 11114 MPa.

Segundo ensaios já realizados na Universidade Federal do Mato Grosso do Sul com o mesmo objeto de estudo, obteve-se experimentalmente o valor médio da resistência à compressão na direção paralela como 44,81 MPa (Mendonça, 2017), assim como foi encontrado o valor de 45,31 MPa (Oliveira, 2020), 47,72 MPa (Manna, 2017) e 50,69 MPa (Silva, 2017). Para o módulo de elasticidade na compressão, foi atingido o valor médio de 19006,51 MPa (Oliveira, 2020).

De acordo com as características apresentadas, a Peroba do Norte pode ser amplamente utilizada na construção civil. Lorenzi (1998) afirma sua utilidade em vigas, caibros, ripas, batentes de portas e janelas, tábuas para assoalhos, rodapés para a fabricação de móveis comuns, carrocerias, além de obras externas (postes, estacas, dormentes e entre outros). Pode substituir madeiras como angelim-pedra, angico, garapa, jatobá, maçaranduba, itaúba e sucupira no emprego de construção pesada externa ou interna, entretanto a espécie não se adequa na fabricação de compensados devido à presença de rachaduras na tora (IPT, 2013).

2.2. Rigidez de elementos de madeira

A rigidez de um material é uma propriedade mecânica que representa a resistência que um elemento tem ao processo de deformação, sendo possível quantificar por meio do módulo de elasticidade obtido a partir de ensaios laboratoriais específicos. Com conceitos semelhantes, a resistência é estabelecida como a capacidade do material de suportar tensões até sua ruptura ou deformação excessiva.

A fim de alinhar a resistência e a rigidez do elemento com as condições ambientais durante a sua vida útil, admite-se a especificação da madeira nas classes de umidade representada pelo quadro 1, sendo considerada como condição padrão de referência o teor de umidade de 12%.

Quadro 1 – Classes de umidade. Fonte: NBR 7190-1 (ABNT, 2022)

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	$\geq 25\%$

A NBR 7190-1 (ABNT, 2022) define a rigidez de elementos de madeira como o valor médio do módulo de elasticidade, na qual se obtêm pelo comportamento elástico-linear do material. Para calcular o módulo de elasticidade na direção paralela às fibras, determina-se a partir do ensaio de flexão (E_m para peças estruturais) ou pelo ensaio de compressão paralela às fibras ($E_{c0,med}$ para corpos de

prova isentos de defeitos). Para casos na direção perpendicular às fibras, o módulo de elasticidade é obtido por meio do ensaio de compressão perpendicular às fibras ($E_{c90,med}$).

Na ausência de experimentos, o módulo de elasticidade na direção perpendicular às fibras ($E_{c90,med}$) é avaliado a partir da seguinte equação 1.

$$E_{c90,med} = \frac{E_m \text{ ou } E_{c0,med}}{20} \quad (1)$$

Onde:

E_m : módulo de elasticidade em peças estruturais na direção paralela às fibras [MPa];

$E_{c0,med}$: módulo de elasticidade em corpos de prova isentos de defeitos na direção paralela às fibras [MPa].

Com o propósito de padronizar as propriedades e facilitar a elaboração de projetos estruturais de madeira, a normativa dispõe de duas tabelas que categorizam as classes de resistências de acordo com os ensaios de corpos de prova isentos de defeitos (quadro 2) e ensaios em peças estruturais (quadro 3).

Quadro 2 – Classes de resistência em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos. Fonte: NBR 7190-1 (ABNT, 2022)

Dicotiledóneas (folhosas)				
(Valores na condição padrão de referência U = 12%)				
Classes	f_{cok} (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{c0,med}$ (MPa)	Densidade a 12% (kg/m ³)
D 20	20	4	10.000	500
D 30	30	5	12.000	625
D 40	40	6	14.500	750
D 50	50	7	16.500	850
D 60	60	8	19.500	1000

Quadro 3 – Classes de resistência em ensaios de peças estruturais. Fonte: NBR 7190-1 (ABNT, 2022)

		Coníferas														Folhosas							
		Símbolo	C14	C15	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	$f_{t0,k}$	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	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34		
Compressão perpendicular	$f_{c90,k}$	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	$f_{v,k}$	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/m³)																							
Densidade característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	560	620	700	900		
Densidade Média	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080		

Dessa forma, é possível observar que há valores distintos no módulo de elasticidade médio paralelo às fibras quando se analisa uma mesma categoria, considerando os valores de resistência da classe.

Para o uso do quadro 3, o módulo de elasticidade paralelo às fibras é determinado pelo ensaio de flexão (E_0). Na hipótese do uso do quadro 2, considera-se a igualdade entre os valores médios na flexão e na compressão paralela às fibras, como mostrado pela equação 2 a seguir.

$$E_{0,med} = E_{c0,med} \quad (2)$$

Onde:

$E_{0,med}$: valor médio do módulo de elasticidade da flexão [MPa];

$E_{c0,med}$: valor médio do módulo de elasticidade na compressão [MPa].

3. METODOLOGIA

Neste trabalho, a espécie de estudo é a madeira Peroba do Norte (*Goupia glabra*) e as análises foram feitas a partir de 12 corpos de prova de compressão e de 6 vigas de dimensões estruturais, de acordo com a NBR 7190-1 (ABNT, 2022), sendo todos os materiais retirados de uma mesma peça inicial com dimensões de aproximadamente 5x115x600 cm.

Conforme a NBR 7190-3 (ABNT, 2022), as amostras foram pesadas com o auxílio da balança de precisão de 0,01g e as medidas foram estabelecidas com o auxílio de trena e paquímetro com precisão de 0,1 mm. Para a execução dos ensaios de compressão paralela às fibras de corpos de prova e flexão de peças estruturais foi utilizado a prensa universal e os cálculos foram realizados com o auxílio do software Microsoft Excel. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

3.1. Ensaio de compressão paralela às fibras de corpos de prova

De início foi realizado o ensaio de compressão paralela às fibras dos corpos de provas isentos de defeitos de acordo com a NBR 7190-3 (ABNT, 2022) com aproximadamente 4,5x4,5x15 cm. As medidas exatas nas extremidades dos corpos de prova foram obtidas com o uso do paquímetro e determinado os tamanhos das seções a partir da média dos valores.

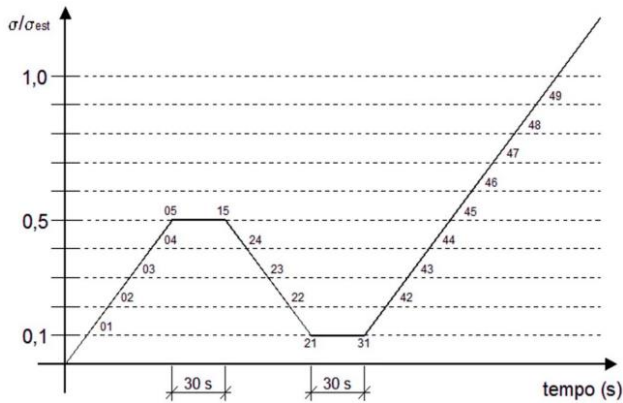
Figura 1 – Ensaio de compressão paralela às fibras de corpos de prova isentos de defeitos. Fonte: Autor (2022)



Para calcular o módulo de elasticidade, as medidas de deformações foram obtidas em duas faces opostas com o auxílio de dois relógios comparadores, um com precisão de milésimo de milímetro e outro com precisão de centésimo de milímetro, ambos fixados por meio de cantoneiras posicionadas com 10 cm de distância. Para o ajuste do corpo de prova à prensa universal utilizou uma rótula, assim como mostra a figura 1, e por fim, a velocidade utilizada em ensaio foi de 0,2 mm/min.

A resistência da Peroba do Norte foi estimada em 90 kN, e a carga foi aplicada por meio de ciclos de carregamento e descarregamento, no qual se aplica até 50% do valor estimado, aguarda-se 30 segundos e descarrega-se até 10% do valor estimado, aguarda-se 30 segundos novamente para que possa voltar a aplicar a carga e levar esse corpo de prova até a ruptura. A figura 2 a seguir mostra o diagrama de carregamento do ensaio.

Figura 2 – Diagrama de carregamento para determinação da rigidez da madeira. Fonte: NBR 7190-3 (ABNT, 2022)



A partir dos dados obtidos é possível determinar o módulo de elasticidade pela inclinação da reta secante do gráfico de tensão x deformação, também obtida com base nos valores de tensão e deformação correspondente à 10% (ponto 31 do diagrama da figura 2) e 50% (ponto 45 do diagrama da figura 2) da resistência à compressão paralela.

Para que seja possível calcular o módulo de elasticidade do corpo de prova a partir dos dados obtidos, utiliza-se a equação 3 a seguir:

$$E_{co} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3)$$

Onde:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$: tensão de compressão equivalente à 10% e 50% da resistência, ou seja, os pontos 31 e 45 da figura 2 [MPa];

$\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$: deformação específica equivalente à 10% e 50% da resistência, ou seja, os pontos 31 e 45 da figura 2 [mm/mm].

Por fim, a resistência à compressão paralela às fibras é determinada pela equação 4.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (4)$$

Onde:

$F_{c0,max}$: máxima força aplicada sobre o corpo de prova durante o ensaio [N];

A : área da seção transversal do corpo de prova [mm²];

f_{c0} : resistência à compressão paralela às fibras [MPa].

3.2. Ensaio de flexão de peças estruturais

Para o ensaio de flexão de peças estruturais foram empregadas vigas de aproximadamente 7x4,5x135cm, da qual foram tomadas medidas do centro da seção com o auxílio do paquímetro e o comprimento foi determinado com uma trena. Para

posicionar na prensa universal, o vão livre deve correspondente a 18 vezes o valor da altura da viga, sendo apoiada em suas extremidades e carregada em dois pontos especificados igualmente espaçados como uma distância de 6 vezes a altura a partir do apoio. O relógio de centésimo de milímetro é fixado à base da prensa e a deformação é medida no centro da viga na face tracionada, assim como mostra na figura 4. O esquema para o ensaio está apresentado na figura 3, e as numerações 1 e 2 representam, respectivamente, o apoio articulado e a placa de suporte.

Figura 3 – Esquema para ensaio de flexão de peças estruturais. Fonte: NBR 7190-4 (ABNT, 2022)

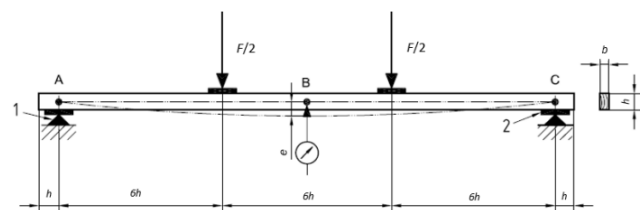


Figura 4 – Ensaio de flexão de peças estruturais. Fonte: Autor (2022)



A figura 4 exibe o ensaio feito em laboratório com suas respectivas adequações para que pudesse estar de acordo com a norma. O ciclo de carregamento corresponde ao mesmo utilizado para os corpos de prova, com valor estimado para ruptura de 100 kN e a velocidade de ensaio de 0,8 mm/min.

Para obter o módulo de elasticidade na flexão, utiliza-se equação 5 a seguir.

$$E_0 = \frac{23}{108} \left(\frac{L}{h}\right)^3 \left(\frac{\Delta F}{\Delta e}\right) \frac{1}{b} \quad (5)$$

Onde:

L : comprimento do vão livre entre os apoios [cm];

h : altura da seção transversal [cm];

ΔF : força incremental [kN];

Δe : deslocamento incremental [mm];

b : largura da seção transversal [cm].

A variação da força e deslocamento incremental é determinado no trecho de 10% a 40% da força estipulada pelo diagrama de carregamento.

Por fim, a resistência convencional à flexão é determinada pela equação 6.

$$f_m = \frac{F_{rupt}L}{bh^2} \quad (6)$$

Onde:

F_{rupt} : força de ruptura aplicada (força última) [N];

L : vão livre entre os apoios, correspondente a 18h [mm];

b : largura da seção transversal da peça estrutural [mm];

h : altura da seção transversal da peça estrutural [mm];

f_m : resistência convencional à flexão [MPa].

3.3. Umidade

Os corpos de prova foram pesados com o uso da balança de precisão e levados para a câmara de secagem, realizando várias pesagens até que a variação entre duas medidas fosse menor ou igual a 0,5% da última massa. Atingindo o peso adequado, é possível determinar a massa seca e com isso, o teor de umidade, que condiz à relação entre a massa de água e a massa seca de acordo com a equação 7. Ao encontrar o valor com base nos corpos de prova, o mesmo será aplicado para as peças estruturais.

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} 100 \quad (7)$$

Onde:

m_i : massa inicial do corpo de prova [g];

m_s : massa seca do corpo de prova [g].

3.4. Valor característico e condição padrão de referência do teor de umidade

Para estimar o valor característico das propriedades do módulo de elasticidade e da resistência, aplica-se a equação 8 a seguir de acordo com a NBR 7190-3

$$X_{wk} = \left(2 \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} - X_{\frac{n}{2}} \right) 1,1 \quad (8)$$

Onde a ordenação dos resultados deve ser na ordem crescente e ignora-se o maior valor quando o conjunto analisado for ímpar. Para ter um resultado condizente, as seguintes condições devem ser respeitadas: X_{wk} não seja inferior a X_1 e ao valor médio da amostra completa (X_m), bem como não seja superior a X_m .

Com o intuito de comparar ou analisar as propriedades da espécie, deve-se corrigir essas propriedades para a condição padrão de umidade definida pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022), como 12%. Para que essa correção seja feita aos 12%, deve-se utilizar as equações 9 e 10, referente à resistência e a rigidez respectivamente, conforme a NBR 7190-1:

$$f_{12} = f_U \left[1 + \frac{3(U - 12)}{100} \right] \quad (9)$$

$$E_{12} = E_U \left[1 + \frac{2(U - 12)}{100} \right] \quad (10)$$

Onde:

U : teor de umidade [%];

f_U : resistência de acordo com o teor de umidade analisado [MPa];

E_U : rigidez de acordo com o teor de umidade analisado [MPa].

Para que as equações 9 e 10 sejam aplicáveis, o teor de umidade do lote analisado dado por U deve estar contido no intervalo de 10% a 25%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor entendimento, os cálculos de módulo de elasticidade e resistência feitos a partir dos dados obtidos em laboratório para o ensaio de compressão dos corpos de prova isentos de defeitos, assim como seus respectivos valores de teor de umidade, são apresentados a seguir na tabela 3. Para o ensaio de flexão de peças estruturais é possível determinar o módulo de elasticidade e resistência e com isso, a tabela 4 expõe esses resultados.

Tabela 3 – Módulo de elasticidade, resistência e teor de umidade dos corpos de prova. Fonte: Autor (2023)

Corpo de prova	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência (MPa)	Teor de umidade (%)
1	16151,2	52,86	9,21
2	17303,8	59,91	9,07
3	17855,0	61,85	9,27
4	15860,7	61,50	9,19
5	18503,7	59,50	9,11
6	19067,3	58,75	9,23
7	15681,4	61,40	9,39
8	15338,6	54,16	9,18
9	17342,4	63,61	9,29
10	11782,2	55,82	9,27
11	17109,3	57,71	9,29
12	19200,5	57,72	9,27
Média	16766,3	58,73	9,23
Média corrigida a 12%	16095,6	55,21	-

Tabela 4 – Módulo de elasticidade e resistência das peças estruturais. Fonte: Autor (2023)

Peça estrutural	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência (MPa)
1	16425,8	79,17
2	12778,5	57,54
3	17583,5	73,33
4	18051,9	96,49
5	16939,0	75,57
6	13771,9	58,08
Média	15925,1	73,86
Média corrigida a 12%	15288,1	69,43

Nos gráficos das figuras 5 e 6, são apresentados um exemplo de diagrama do ensaio em corpo de prova e em peça estrutural, respectivamente. A partir deles pode-se analisar que a obtenção do módulo de elasticidade está de acordo com o previsto nas NBR 7190-3 e NBR 7190-4 (ABNT, 2022), na qual a determinação se dá por meio do trecho linear do diagrama, sendo assim estipulado pela inclinação da reta secante à curva de tensão versus deformação ou força versus deslocamento. Para corpos de prova esse intervalo é definido para o intervalo entre os trechos de 10% e 50% e para as peças estruturais se dá entre 10% e 40%.

Ao obter a média do teor de umidade dos corpos de prova como 9,23%, o mesmo valor se aplica às peças

estruturais para fins de cálculos. Entretanto, como a madeira estava mais seca do que o intervalo previsto pela normativa, é adotado o valor de 10% para a material se adequar ao trecho designado pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022). Dessa forma, é possível realizar as correções das propriedades de módulo de elasticidade e resistência de acordo com o padrão de referência com o teor de umidade de equilíbrio de 12%.

Figura 5 – Diagrama de tensão versus deformação para corpo de prova 11. Fonte: Autor (2022)

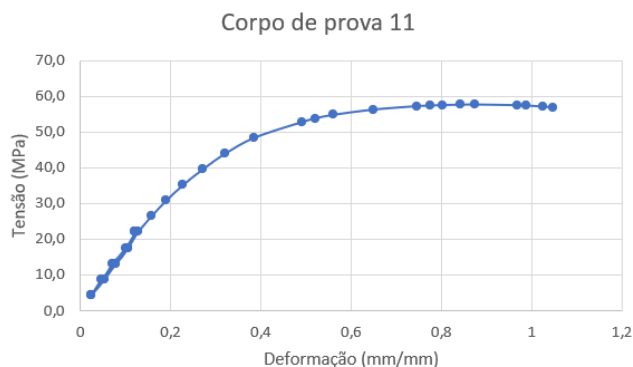


Figura 6 – Diagrama de força versus deslocamento para peça estrutural 2. Fonte: Autor (2022)



De acordo com o Anexo A da NBR 7190-3 (ABNT, 2022), a madeira Peroba do Norte tem sua classe de resistência classificada como D40. Com isso, a tabela 5 apresentará os resultados experimentais corrigidos à condição padrão de 12% em comparativo com os valores previstos pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022) no quadro 2.

Tabela 5 – Resultados experimentais e enquadramento como D40. Fonte: Autor (2023)

	Corpo de prova		Peça estrutural	
	Ensaio	Previsto NBR (quadro 2)	Ensaio	Previsto NBR (quadro 3)
f característico (MPa)	54,34	40	54,09	40
E característico (MPa)	13534,1	-	12267,4	11000
E médio (MPa)	16095,6	14500	15288,1	13000

Entretanto, ao analisar os resultados obtidos experimentalmente, é possível fazer um novo enquadramento da madeira de estudo, com o intuito de ajustá-la de uma forma mais adequada. Como os valores de resistência, tanto na compressão quanto na flexão, são superiores a 50 MPa, ela poderia ser classificada como D50. Com isso, a tabela 6 irá mostrar essa sugestão.

Tabela 6 – Resultados experimentais e um novo enquadramento como D50. Fonte: Autor (2023)

	Corpo de prova		Peça estrutural	
	Ensaio	Previsto NBR (quadro 2)	Ensaio	Previsto NBR (quadro 3)
f característico (MPa)	54,34	50	54,09	50
E característico (MPa)	13534,1	-	12267,4	12000
E médio (MPa)	16095,6	16500	15288,1	14000

Ao analisar a tabela 6 e com base na normativa (quadro 2), a madeira se apresenta com a nova classificação de resistência como D50. Tem como previsto sua resistência característica à compressão paralela (f_{c0k}) como 50 MPa e o valor médio do módulo de elasticidade na compressão medido na direção paralela ($E_{c0,med}$) como 16500 MPa.

Experimentalmente, a resistência característica à compressão paralela do corpo de prova (f_{c0k}) foi de 54,34 MPa e o valor médio do módulo de elasticidade na compressão medido na direção paralela para o mesmo ($E_{c0,med}$) foi de 16095,6 MPa.

Para averiguar as peças estruturais, utiliza-se como referência o quadro 3 com o enquadramento na D50, na qual a resistência característica à flexão ($f_{b,k}$) é de 50 MPa, o valor característico do módulo de elasticidade na flexão medido na direção paralela ($E_{0,05}$) como 12 GPa e o valor médio do módulo de elasticidade na flexão medido na direção paralela ($E_{0,m}$) como 14 GPa.

Obtido em ensaios e conforme o padrão de referência, para as peças estruturais foi obtido a resistência característica à flexão ($f_{b,k}$) como 54,09 MPa, valor médio do módulo de elasticidade na flexão medido na direção paralela ($E_{0,m}$) como 15288,1 MPa e o valor característico do módulo de elasticidade na flexão medido na direção paralela ($E_{0,05}$) como 12267,4 MPa.

Nesse enquadramento, todos os resultados experimentais estão de acordo com a questão de segurança, exceto o valor médio do módulo de elasticidade do corpo de prova na qual está abaixo ao valor previsto pela norma.

Ademais, a partir dos dados obtidos experimentalmente e já corridos para o teor de umidade de 12%, é possível calcular o desvio padrão e o coeficiente de variação para que seja possível averiguar a consistência do ensaio. Com isso, a tabela 7 a seguir mostrará esses resultados.

Tabela 7 – Desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados experimentais com correção do teor de umidade. Fonte: Autor (2023)

	Corpo de prova		Peça estrutural	
	Módulo de elasticidade	Resistência	Módulo de elasticidade	Resistência
Desvio padrão (MPa)	1867,64	2,93	1883,23	13,32
Coefficiente de variação (%)	11,60	5,30	12,32	17,81

Observa-se que no caso dos corpos de prova, o valor do coeficiente de variação da resistência é plausível, sendo esse resultado justificado pela presença de pequenas irregularidades devido ao procedimento de corte na qual afetou a distribuição de força durante o ensaio na prensa universal, bem como a leitura manual dos relógios, ocasionando dessa forma possíveis imprecisões.

No caso da peça estrutural, é visível um valor mais significativo no coeficiente de variação da resistência pelo fato de ser constituído por medidas maiores quando comparado ao corpo de prova. Ademais, o material contava com certas partes empenadas, assim como existiu dificuldade em manter durante todo o ensaio a distribuição das duas cargas de forma pontual e perpendicular à viga como o esquema da figura 3 exemplifica. Dessa maneira, justifica-se esse valor mais acentuado.

No âmbito de se utilizar da igualdade dos módulos de elasticidade para a compressão de corpos de prova isentos de defeitos e a flexão de peças estruturais, pode-se validar essa equivalência, pois experimentalmente, o valor médio do módulo de elasticidade para corpos de prova é de 16095,6 e o valor médio da rigidez para peças estruturais é de 15288,1. Com isso, a diferença percentual dessa propriedade é de 5,28%, valor inferior quando comparado ao coeficiente de variação do módulo de elasticidade para ambos os casos, que se encontra próximo dos 12%. Para reforçar esse ponto, o desvio padrão do módulo de elasticidade de ambos os casos é dado como alto devido à ordem de grandeza do índice analisado, no entanto o coeficiente de variação é significativamente baixo e semelhante, na qual valida como os ensaios foram plausíveis e homogêneos (inferior ao índice de 20% designado pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022)).

Ainda é possível obter uma razão de 0,95 entre o módulo de elasticidade médio da flexão de peças estruturais e o módulo na compressão de corpos de prova, mostrando assim uma homogeneidade dos resultados. Para a razão entre a resistência média na flexão e na compressão esse valor é de 1,26, entretanto para o dimensionamento é utilizado o valor característico da resistência e para ambos os ensaios os resultados estavam equivalentes.

Além disso, é possível reforçar os valores obtidos com os apresentados na literatura por Baena (2015) que obtém como valor médio da resistência à compressão paralela às fibras 56,3 MPa, assim como 50,69 MPa tido por Silva (2017).

Apesar da NBR 7190-1 (2022) ter realizado uma redução dos valores do módulo de elasticidade médio quando comparado com a versão da NBR 7190 (1997), a revisão ainda conta com valores altos para essa propriedade, permanecendo dessa forma contra às condições de segurança. Com isso, indica-se a necessidade de uma nova revisão desses valores.

5. CONCLUSÕES

Após o estudo de caso, pode-se afirmar que a madeira Peroba do Norte (*Goupia glabra*) possui equivalência no módulo de elasticidade médio de peças estruturais e corpos de prova isentos de defeitos. Ademais, também é válido utilizar a semelhança da resistência característica, pois para ambos os casos, os valores são próximos, ou seja, a realização do ensaio para corpos de prova isentos de defeitos que é mais difundido na prática pela facilidade de reprodução satisfaz por si só a análise de dados do objeto de estudo.

Ademais, é possível realizar enquadramentos de classes de resistências mais favoráveis além daquelas determinadas pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022). Por mais que os resultados experimentais sobressaíram aos valores citados na revisão bibliográfica, pode-se considerar que foi um caso isolado ao lote escolhido aleatoriamente, devido às poucas unidades ensaiadas. Para que seja confirmado esses valores, mais trabalhos devem ser realizados.

Vale ressaltar que a determinação feita nesse estudo partiu de uma única espécie com um lote preciso, com o intuito de enquadrá-la de acordo com a classe de resistência da NBR 7190-1 (2022). Entretanto indicativos apresentam que o valor médio do módulo de elasticidade ainda pode se manifestar como elevado e condiz contra às condições de segurança para um dimensionamento adequado. Com isso, sugere-se o estudo de mais espécies nativas

brasileiras para contribuir e comprovar esse fato, indicando a necessidade de uma nova revisão desses valores do módulo de elasticidade da NBR 7190 (2022).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D. H. de. Proposta de método de ensaio para determinação da resistência da madeira ao embutimento. Orientador: Antonio Alves Dias. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7190-3: Projeto de estruturas de madeira – Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7190-4: Projeto de estruturas de madeira – Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização peças estruturais. Rio de Janeiro, 2022.

BAENA, J. S. Comparação dos critérios de dimensionamento de ligações por pinos metálicos (parafusos) em estruturas de madeira. Orientador: Antonio Alves Dias. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

CALIL, C. J.; DIAS, A. A.; ROCCO LAHR, F. A.; MARTINS, G. C. A. Estruturas de madeira: projetos, dimensionamento e exemplos de cálculo. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

CHRISTOFORO, A. L.; FILHO, S. L. M. R.; PANZERA, T. H.; ROCCO LAHR, F. A. Metodologia para o cálculo dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal em vigas de madeira de dimensões estruturais. Ciência Rural, Santa Maria, v. 43, n. 4, p. 610-615, 2013.

EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL. Comunicado técnico, 262. Belém, Pará, 2015.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. Madeira

– Uso sustentável na construção civil. 2ª ed. São Paulo, 2009.

corpos de prova de *Pinus elliotti*. Scientia Florestalis, v. 41, n. 98, p. 283-291, 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil. São Paulo, 2013.

LORENZI, H. Árvores brasileiras – Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 2ª ed, Nova Odessa, São Paulo: Editora Plantarum, 1998, v.2.

MANNA, E. A. M. B. Comparação entre valores de ensaios experimentais e calculados da resistência ao embutimento da madeira de *Goupia glabra* pelo método do Eurocode. Orientadora: Christiane Areias Trindade. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2017.

MENDONÇA, T. L. R. Comparação entre valores de ensaios experimentais e calculados da resistência ao embutimento da madeira de *Goupia glabra*. Orientadora: Christiane Areias Trindade. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2017.

OLIVEIRA, J. T. S. Característica da madeira de eucalipto para a construção civil. Orientador: João Cesar Hellmeister. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

OLIVEIRA, T. G. de. Resistência da madeira Peroba do Norte (*Goupia glabra*) ao embutimento na direção normal às fibras. Orientadora: Christiane Areias Trindade. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2020.

SILVA, E. M. Comparação entre valores experimentais e estimados da resistência ao embutimento da madeira de *Goupia glabra* pelo método Eurocode. Orientadora: Christiane Areias Trindade. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2017.

ZANGIÁCOMO, A. L.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. Avaliação do módulo de elasticidade de peças estruturais roliças e de