

UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, SOCIAIS, TECNOLÓGICAS E LETRAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MARLY CIRQUEIRA SANTOS

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE FLAMBAGEM DE
PEÇAS DE MADEIRA SERRADA DE PARICÁ (*SCHIZOLOBIUM AMAZONICUM*)
COMPRIMIDAS EM TRÊS CONDIÇÕES DE APOIO**

Açailândia

2022



MARLY CIRQUEIRA SANTOS

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE FLAMBAGEM DE
PEÇAS DE MADEIRA SERRADA DE PARICÁ (*SCHIZOLOBIUM AMAZONICUM*)
COMPRIMIDAS EM TRÊS CONDIÇÕES DE APOIO**

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade Estadual da
Região Tocantina do Maranhão para o grau de
bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. João Miguel Santos Dias.

Açailândia

2022



S237d

Santos, Marly Cirqueira

Determinação experimental do coeficiente de flambagem de peças de madeira serrada de paricá (*Schizolobium Amazonicum*) comprimidas em três condições de apoio / Marly Cirqueira Santos – Açailândia: UEMASUL, 2022.

78 f. : il.

Monografia (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Açailândia, MA, 2022.

1. Coeficiente de flambagem. 2. Compressão de peças esbeltas. 3. Carga crítica. I. Título.

*Ficha Catalográfica elaborada por **Kenilce Reis** – Bibliotecária CRB 13/840*



MARLY CIRQUEIRA SANTOS

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE FLAMBAGEM DE
PEÇAS DE MADEIRA SERRADA DE PARICÁ (*SCHIZOLOBIUM AMAZONICUM*)
COMPRIMIDAS EM TRÊS CONDIÇÕES DE APOIO**

Monografia apresentada junto ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 12 /08 /2022

BANCA EXAMINADORA

João Miguel Santos Dias

Prof. Me. João Miguel Santos Dias (Orientador)

Mestre em Engenharia Ambiental Urbana

Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

Sandro Fábio César

Prof. Dr. Sandro Fábio César

Doutor em Engenharia de Produção

Universidade Federal da Bahia

Luis Jorge Souza dos Anjos

Prof. Esp. Luis Jorge Souza dos Anjos

Especialista em Ensino de Matemática Financeira e Estatística

Faculdade Vale do Aço Ltda



Com imensa gratidão dedico este trabalho a Deus, meus pais: Jose Maria Rocha Santos e Luzinete Cirqueira Santos, minhas irmãs: Maysa Cirqueira Santos e Meire Cirqueira Santos, meu namorado, Caio Valentin Pereira Franco e aos amigos, por me fortalecerem todos os dias.



AGRADECIMENTOS

A Deus, por seu amor infinito que me guia e permite evoluir todos os dias.

Aos meus amados pais, Jose Maria Rocha Santos e Luzinete Cirqueira Santos, por todo amor, cuidado, confiança, por acreditarem e se dedicarem tanto no meu sonho.

As minhas amadas irmãs, Maysa Cirqueira Santos, Meire Cirqueira Santos e minha “maninha” do coração Marta Laura Milhomem da Cruz, por nossa união, companheirismo, palavras de ânimo, preocupação e por toda expressão de amor e zelo no nosso grupo “Maninhas”.

Ao meu namorado, Caio Valentin Pereira Franco, por todo apoio e incentivo.

Aos meus amigos por todo companheirismo e apoio com a minha pessoa.

Ao meu professor orientador, Me. João Miguel Santos pela idealização, orientação e aperfeiçoamento deste trabalho, pela disponibilidade de tempo e paciência durante todo o processo dos ensaios e correção do trabalho.

Aos meus colegas do grupo de pesquisa, Sandriel Lima Nascimento e Vinícius de Sousa Lima por toda a dedicação e disponibilidade de tempo durante a realização dos ensaios.

Ao professor Luis Jorge Souza dos Anjos, pela contribuição e correção das deduções de fórmulas.

A empresa Mapri Compensados, pela doação das toras da madeira de paricá.

A UEMASUL, pela bolsa de iniciação científica cedida para a realização desta pesquisa.



Por isso não tema, pois estou com você; não tenha medo, pois sou o seu Deus. Eu o fortalecerei e o ajudarei; eu o segurarei com a minha mão direita vitoriosa.

Isaías 41:10



RESUMO

A madeira é um material estrutural eficiente, não apenas pela ótima relação resistência mecânica/peso próprio que apresenta, mas também porque se trata de um material que impulsiona o desenvolvimento sustentável. A madeira de paricá (*Schizolobium Amazonicum*), assumiu particular importância especialmente na região Norte brasileira pelo rápido crescimento, ser relativamente imune a pragas e doenças e uma opção regional que supre a demanda de matéria-prima florestal e recompõe áreas degradadas. Um dos principais meios de utilização dessa madeira é a construção civil, que a utiliza como elemento estrutural. Apesar da versatilidade da madeira em estruturas existentes ao redor do mundo, inerente às vantagens deste material, a norma ABNT NBR 7190:1997, apresenta lacunas relevantes para o dimensionamento estrutural, onde apenas refere duas condições de vinculação (bi-rotulado e engastado-livre) para elementos estruturais comprimidos e não apresenta nenhum valor de k recomendado. Já a norma ABNT NBR 7190-1:2022 apresenta coeficientes para vários tipos de vinculação externa, porém, nos casos de barras bi-engastada (EE), engastada-apoiada (EA) e bi-apoiada (AA), os valores de k recomendados são iguais aos da norma ABNT NBR 8800:2008, não existindo nenhuma validação em termos de campanha experimental que sustente esses valores. O objetivo deste trabalho foi determinar o coeficiente de flambagem de peças comprimidas de madeira serrada de paricá em três situações de vinculação externas, sendo estas usuais em estruturas de madeira convencionais. Para isso, foi feita a caracterização física e mecânica da madeira analisando o teor de umidade, as densidades aparente e básica, a resistência à compressão paralela à grã e módulo de elasticidade à compressão paralela à grã. A caracterização física da madeira de paricá utilizada, revelou que esta apresentava teor de umidade entre 10,12% a 10,72% para as toras 1,2,3 e 4 e 12,28% para a tora 5, densidade aparente de 275,57 kg.m⁻³ e densidade básica de 236,42 kg.m⁻³. O ensaio de compressão paralela à grã revelou um valor médio de 20,36 Mpa e o módulo de elasticidade à compressão paralela à grã apresentou média de 7358,90 Mpa. Os valores experimentais de k , obtidos para a condição de apoio EE foi de 0,97 para valor máximo e 0,7 para médio. A condição de vinculação EA obteve valor máximo de 0,79 e valor médio de 0,68. Em relação a condição AA, esta obteve 1,19 e 0,96 para valor máximo e médio, respectivamente. Os valores experimentais obtidos máximos foram superiores aos valores teóricos e normativos, com a exceção da condição EA. Isto revela a necessidade de mais ensaios com outras espécies de madeira e vinculações para se propor valores normativos mais adequados de coeficientes k .

Palavras-chave: Coeficiente de flambagem. Compressão de peças esbeltas. Carga crítica.



ABSTRACT

Wood is an efficient structural material, not only because of its excellent mechanical strength/weight ratio, but also because it is a material that drives sustainable development. Paricá wood (*Schizolobium Amazonicum*), has assumed particular importance, especially in the North region of Brazil, due to its rapid growth, being relatively immune to pests and diseases and a regional option that meets the demand for forest raw materials and restores degraded areas. One of the main uses of this wood is civil construction, which uses it as a structural element. Despite the versatility of wood in existing structures around the world, inherent to the advantages of this material, the ABNT NBR 7190:1997 standard presents relevant gaps for structural design, where it only mentions two bonding conditions (bi-labeled and free-setting) for compressed structural elements and has no recommended k value. The ABNT NBR 7190-1:2022 standard, on the other hand, presents coefficients for various types of external binding, however, in the case of double-set (EE), set-supported (EA) and bi-supported (AA) bars, the values of k recommended are the same as those of the ABNT NBR 8800:2008 standard, and there is no validation in terms of an experimental campaign that supports these values. The objective of this work was to determine the buckling coefficient of compressed pieces of paricá sawn wood in three situations of external binding, which are usual in conventional wooden structures. For this, the physical and mechanical characterization of the wood was carried out, analyzing the moisture content, the apparent and basic densities, the compressive strength parallel to the grain and the modulus of elasticity to the compression parallel to the grain. The physical characterization of the paricá wood used revealed that it had a moisture content between 10.12% and 10.72% for logs 1,2,3 and 4 and 12.28% for log 5, apparent density of 275.57 kg.m⁻³ and basic density of 236.42 kg.m⁻³. The compression test parallel to the grain showed an average value of 20.36 Mpa and the modulus of elasticity to compression parallel to the grain showed an average of 7358.90 MPa. The experimental values of k obtained for the support condition EE were 0.97 for maximum value and 0.7 for average. The EA binding condition had a maximum value of 0.79 and a mean value of 0.68. Regarding the AA condition, it obtained 1.19 and 0.96 for maximum and average values, respectively. The maximum experimental values obtained were higher than the theoretical and normative values, with the exception of the EA condition. This reveals the need for more tests with other wood species and connections to propose more adequate normative values of k coefficients.

Key Words: Buckling coefficient. Compression of slender parts. Critical load.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barra indeformada.....	22
Figura 2 – Barra deformada.....	22
Figura 3 - Diagrama de equilíbrio para flambagem de uma estrutura idealizada.....	23
Figura 4 - Diagrama de corpo livre de barra bi-articulada.	24
Figura 5 – Exemplo de curva de Euler para um aço MR 250.	25
Figura 6 - Diagrama de corpo livre de barra biengastada.....	27
Figura 7 - Comprimento de flambagem para barra bi-engastada.	27
Figura 8 - Diagrama de corpo livre de barra engastada e apoiada.	28
Figura 9 - Peças comprimidas reais.....	30
Figura 10 – Geometria dos CP para o ensaio de teor de umidade.....	34
Figura 11 – Diagrama do carregamento para determinação da rigidez à compressão segundo a ABNT NBR 7190:1997.	37
Figura 12 – Diagrama do carregamento para determinação da rigidez à compressão segundo a ABNT NBR 7190-3:2022.....	37
Figura 13 – Gráfico tensão x deformação da compressão paralela à grã.	38
Figura 14 – Ligação sem rigidez à rotação.....	46
Figura 15 – Ligação rígida.....	46
Figura 16 - Mordentes da prensa hidráulica.	47
Figura 17 - CP com extremidades bi-apoiadas.....	47
Figura 18 - CP com extremidade engastada-apoiada.	48
Figura 19 - Valores de densidade aparente do paricá obtidos na bibliografia.....	51
Figura 20 - Valores de densidade básica do paricá obtidos na bibliografia.	52
Figura 21 - Valores da literatura para o valor médio da resistência à compressão paralela à grã.	54
Figura 22 – Curvatura inicial no CP de compressão de peças esbeltas.....	56



LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores de coeficientes de flambagem por flexão.....	19
Quadro 2 – Valores dos coeficientes K_e	20



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões dos CPs das caracterizações física e mecânica e taxas de carregamento utilizadas.....	43
Tabela 2 - Propriedades físicas da madeira de paricá.....	49
Tabela 3 - Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para o teor de umidade.....	50
Tabela 4 - Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a densidade aparente.	50
Tabela 5 - Resultados da resistência à compressão paralela à grã da madeira de paricá.	53
Tabela 6 - Tabela este de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a resistência à compressão paralela à grã.....	53
Tabela 7 - Coeficiente de variação entre as resistências à compressão paralela à grã das quatro toras.	53
Tabela 8 – Propriedade de rigidez da Tora 5.....	54
Tabela 9 – Coeficientes de flambagem (k) para os três tipos de apoio.	55
Tabela 10 – Valores teóricos, normativos e experimentais de coeficientes de flambagem k para as condições de apoio (EE, EA e AA).....	56



LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

UEMASUL - Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão



LISTA DE ABREVIATURAS

AA - apoio-apoio

CP - corpo de prova

EA - engaste-apoio

EE - engaste-engaste



LISTA DE SÍMBOLOS

% - porcentagem

$E_{c,0}$ - módulo de elasticidade na compressão paralela à grã

$E_{c,90}$ - ensaio de módulo de elasticidade na compressão normal à grã

$f_{c,0}$ - resistência à compressão paralela à grã

$f_{c,90}$ - resistência à compressão normal à grã

$f_{e,0}$ - resistência ao embutimento paralelo à grã

$f_{e,90}$ - resistência ao embutimento normal à grã

f_M - resistência à flexão

$f_{s,0}$ - resistência ao fendilhamento

$f_{t,0}$ - resistência à tração paralela à grã

$f_{t,90}$ - resistência ao cisalhamento paralelo à grã

$f_{v,0}$ - resistência ao cisalhamento paralelo à grã

L_{fl} - comprimento de flambagem

P_{cr} - carga crítica

X_{wk} - valor característico

m_i - massa inicial

m_s - massa seca

δ_0 - imperfeição geométrica

δ_t - deflexão total

ρ_{ap} - densidade aparente

$\rho_{bás}$ - densidade básica

σ_E - tensão limite de escoamento

σ_{cr} - tensão crítica

$\sigma_{máx}$ - tensão máxima

A - área

E - módulo de elasticidade

I - momento de inércia

L - comprimento real

M - momento fletor

P - carga axial de compressão



U - teor de umidade

V - força cortante

c - distância do eixo neutro até a fibra externa

e - excentricidade

k - coeficiente de flambagem

r - raio de giração

x - deflexão na direção y

y - deflexão

δ - excentricidade adicional

λ - índice de esbeltez

π – pi



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	21
1.2	Objetivos.....	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivos Específicos	21
2	REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1	Flambagem de peças comprimidas	22
2.2	Carga crítica para peça comprimida ideal.....	23
2.3	Carga crítica para barra bi-engastada.....	26
2.4	Carga crítica para barra engastada e apoiada	28
2.5	Fórmula da secante	29
2.6	Ensaio de caracterização física e mecânica	32
2.6.1	Teor de umidade	34
2.6.2	Densidades aparente e básica	34
2.6.3	Resistência e rigidez à compressão paralela à grã.....	36
2.7	A madeira de paricá	38
2.7.1	Propriedades físicas do paricá	39
2.7.2	Propriedades mecânicas do paricá.....	41
3	METODOLOGIA.....	43
3.1	Ensaio de caracterização física.....	44
3.2	Ensaio de caracterização mecânica.....	45
3.3	Ensaio de compressão de peças esbeltas.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Caracterização física	49
4.2	Caracterização mecânica	52
4.3	Ensaio de compressão de peças esbeltas para a determinação dos coeficientes de flambagem k	55
5	CONCLUSÕES.....	59
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A - SOLUÇÃO GERAL PARA A EQUAÇÃO DIFERENCIAL LINEAR HOMOGÊNEA DE SEGUNDA ORDEM EM UMA BARRA BI-APOIADA.....	66



APÊNDICE B - SOLUÇÃO GERAL PARA A EQUAÇÃO DIFERENCIAL LINEAR NÃO HOMOGÊNEA DE SEGUNDA ORDEM EM UMA BARRA BI –ENGASTADA	67
APÊNDICE C - SOLUÇÃO GERAL PARA A EQUAÇÃO DIFERENCIAL LINEAR NÃO HOMOGÊNEA DE SEGUNDA ORDEM EM UMA BARRA ENGASTADA-APOIADA	69
APÊNDICE D - SOLUÇÃO GERAL PARA A EQUAÇÃO DIFERENCIAL LINEAR NÃO HOMOGÊNEA DE SEGUNDA ORDEM QUE DETERMINA A FÓRMULA DA SECANTE	71
APÊNDICE E – COMPRIMENTO DOS CPS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DE PEÇAS ESBELTAS	72
APÊNDICE F - TAXA DE APLICAÇÃO DE CARGA PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO DE PEÇAS ESBELTAS	73
APÊNDICE G - TABELAS	74



1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material estrutural eficiente, não apenas pela ótima relação resistência mecânica/peso próprio que apresenta (DIAS, 2015), mas também porque se trata de um material que impulsiona o desenvolvimento sustentável (BISSOLI-DALVI et al., 2017). É uma matéria-prima abundante, pode ser facilmente trabalhada, não exigindo ferramentas ou equipamentos de grande potência (LEPAGE, SALIS e GUEDES, 2017). Dias (2015) refere que a madeira é capaz de proporcionar conforto visual, desempenha adequadamente funções de isolamento térmico e acústico. Este material também é uma alternativa para fins estruturais devido ao seu comportamento em situação de incêndio, apresentando desempenho mecânico que garante a segurança nestas situações e, suas características físicas – desde que compatibilizadas com as situações de serviço – assegura o tempo de vida útil legal das edificações (DIAS et al., 2019).

A utilização de madeira serrada proveniente de florestas plantadas surge como uma solução para a conservação da vegetação natural (LIMA et al., 2022a). O paricá (*Schizolobium Amazonicum*), assumiu particular importância especialmente na região Norte brasileira pelo rápido crescimento, boa adaptação às diferentes condições edafoclimáticas, uso generalizado de sua madeira e ser relativamente imune a pragas e doenças (ALMEIDA et al., 2013), assim como por ser uma opção regional que supre a demanda de matéria-prima florestal e recompõe áreas degradadas (CORDEIRO et al., 2015).

A madeira de paricá pode atingir uma produção volumétrica de 38 m³/ha/ano (PEREIRA et al., 2017) mesmo sem a adoção de programas de melhoramento, comumente utilizados nos plantios em larga escala no Brasil (VIDAURRE et al., 2012). Um dos principais meios de utilização dessa madeira é a construção civil, que a utiliza como elemento estrutural (ALMEIDA et al., 2013).

O uso da madeira para fins estruturais, tanto no caso do paricá, quanto para as demais espécies, demanda cuidados para evitar o surgimento de manifestações patológicas devido à degradação do material provocada por agentes biológicos e não biológicos (LEPAGE, SALIS e GUEDES, 2017). Além disso, a madeira é um material anisotrópico (DIAS, 2015), o que está relacionado com a troca de moléculas de água com o meio circundante (ALMEIDA et al., 2013). Dias (2015) também refere que uma característica deste material é o fato de ele ser heterogêneo, isto é, não possui a mesma estrutura físico-química, de forma contínua nas três direções ortogonais.



Apesar do conhecimento acerca do comportamento estrutural da madeira ser crescente, ainda residem alguns preconceitos provocados pela insuficiente divulgação das informações tecnológicas. Dias et al. (2019) refere que a desinformação acerca da madeira inclui o desconhecimento referente às suas condições de serviço, nomeadamente o fraco desempenho estrutural e de durabilidade, além das questões ambientais. Existe também, a falta de preparação das empresas revendedoras no que concerne à comercialização de seções transversais não condizentes com a normatização em vigor, além da utilização de nomenclaturas divergentes das bitolas (ZENID et al., 2012) e do desconhecimento das normas técnicas (GAMA et al., 2016) que, por exemplo, objetivam a classificação visual de defeitos e o dimensionamento de estruturas. Esse desconhecimento da normatização e das vantagens do uso da madeira como material estrutural ocorre no seio do público e dos profissionais da construção civil.

Apesar da versatilidade da madeira em estruturas existentes ao redor do mundo, inerente às vantagens deste material, a norma ABNT NBR 7190:1997 – *Projeto de Estruturas de Madeira*, apresenta lacunas relevantes para o dimensionamento estrutural. No que concerne ao dimensionamento de peças comprimidas, a norma ABNT NBR 7190:1997 considera apenas dois coeficientes de flambagem (k), aplicáveis às condições de apoio bi-rotulada e engastada-livre (DIAS, 2018).

No caso do dimensionamento de elementos estruturais comprimidos de concreto armado, a norma ABNT NBR 6118:2014 – *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*, apresenta dois valores para coeficientes de flambagem: peça comprimida com apoios rotulados nas extremidades ($k = 1,0$) e peça com as extremidades engastada e livre ($k = 2,0$). Esse fato se deve ao comportamento monolítico do concreto armado que não permite outras situações de vinculação. Relativamente ao dimensionamento de estruturas de aço, devido à maior diversidade de configuração de ligações, a norma ABNT NBR 8800:2008 – *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*, apresenta vários valores para k em função das condições de vinculação, conforme apresentado no Quadro 1.



Quadro 1 – Valores de coeficientes de flambagem por flexão.

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	 Rotação e translação impedidas  Rotação livre, translação impedida  Rotação impedida, translação livre  Rotação e translação livres					

Adaptado de: ABNT 8800 (2008).

A norma ABNT NBR 7190:1997 refere que as ligações com pinos metálicos, pregos ou parafusos poderão ser consideradas rígidas se apresentarem quatro ou mais elementos de ligação. Por conseguinte, o fato da norma apresentar somente as duas condições de vinculação supracitadas ($k = 1,0$ e $k = 2,0$), desconsidera várias outras situações nas quais as ligações possuem ou não rigidez à rotação e/ou restrição de deslocamentos lineares. Assim como as estruturas de aço, as estruturas de madeira também podem apresentar várias configurações de ligações, sendo inclusive possível se obter aquelas que constam no Quadro 1.

Dessa forma, uma peça comprimida que apresente extremidades com rigidez à rotação (engastes) terá, necessariamente, um dimensionamento antieconômico ao se considerar um valor de k igual a 1,0, uma vez que a P_{cr} diminui ao ponto de considerar uma situação mais insegura do que ocorre na realidade. Por outro lado, analisando a ABNT NBR 8800:2008, existem valores de k recomendados e que deverão fazer parte do dimensionamento, uma vez que é necessário manter uma margem de segurança mínima em relação aos valores teóricos advindos da Resistência dos Materiais, o que não é apresentado pela norma ABNT NBR 7190:1997.

A norma ABNT NBR 7190-1:2022 – *Projeto de Estruturas de Madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento*, considera várias condições de vinculações externas, com valores de k iguais aos valores da norma ABNT NBR 8800:2008 para as cinco primeiras condições apresentadas, como mostra o Quadro 2, corrigindo de certa forma as lacunas existentes na norma ABNT NBR 7190:1997, em relação aos coeficientes de flambagem (k), no entanto não existe nenhuma validação desses valores em termos de ensaios experimentais.

Quadro 2 – Valores dos coeficientes K_E .

Modos de flambagem						
Valores de projeto para K_E	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,40
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				

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

Poucos trabalhos têm se dedicado ao estudo do coeficiente de flambagem k de peças de madeira serrada comprimidas sujeitas à compressão pura. O trabalho de Ehrhart et al. (2020) refere que o Eurocódigo 5 não apresenta exatidão na previsão da capacidade de carga para peças comprimidas de madeira lamelada colada de faia europeia (*Fagus sylvatica L.*) sujeitas à flambagem. Os mesmos autores referem que esse fato é devido às propriedades físicas e mecânicas, além das imperfeições do material.

1.1 Justificativa

A norma ABNT NBR 7190:1997 apenas refere duas condições de vinculação (bi-rotulado e engastado-livre) para elementos estruturais comprimidos e não apresenta nenhum valor de k recomendado para manter a margem de segurança mínima, face ao valor de k teórico. Já a norma ABNT NBR 7190-1:2022 apresenta coeficientes para vários tipos de vinculação externa, porém, nos casos de barras bi-engastada (EE), engastada-apoiada (EA) e bi-apoiada (AA), os valores de k recomendados são iguais aos da norma ABNT NBR 8800:2008, não existindo nenhuma validação em termos de campanha experimental que sustente esses valores. Desta forma, existe a necessidade de verificar os valores de coeficientes de flambagem (k) experimentais para peças comprimidas vinculadas externamente nas três condições acima referidas, a fim de considerar as ligações mais frequentes em estruturas de madeira no dimensionamento estrutural.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Determinar o coeficiente de flambagem de peças comprimidas de madeira serrada de paricá (*Schizolobium amazonicum*) em três situações de vinculação de apoio diferentes.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar o teor de umidade e as densidades aparente e básica da madeira;
- Caracterizar a madeira de paricá quanto à compressão paralela à grã;
- Dimensionar os corpos de prova em função da carga crítica de Euler e das dimensões do equipamento de ensaio;
- Obter o coeficiente de flambagem experimentalmente para três condições de vinculação;
- Comparar os valores experimentais e teóricos do coeficiente de flambagem.



2 REVISÃO DA LITERATURA

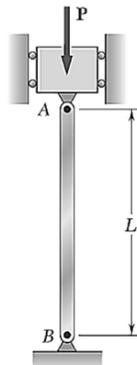
2.1 Flambagem de peças comprimidas

Para Hibbeler (2018), o dimensionamento de um elemento estrutural comprimido deverá ter em consideração a flambagem, que é definida como o fenômeno que ocorre quando uma carga axial de compressão (P) ocasiona uma deflexão na direção perpendicular ao eixo longitudinal da peça. Desta forma, origina-se uma flexão em torno do eixo principal de menor inércia de sua seção transversal (MELCONIAN, 2012). A flambagem poderá originar uma situação de ruptura frágil da peça comprimida, o que não é compatível com os critérios de segurança que deverão ser adotados no dimensionamento estrutural (HIBBELER, 2018).

A carga axial máxima que uma barra pode estar sujeita sem que ocorra o fenômeno de flambagem é denominada de carga crítica de Euler ou apenas carga crítica, P_{cr} (Figura 1). Qualquer incremento de carga acima deste valor, provocará a flambagem da peça comprimida (HIBBELER, 2018).

Considere-se um sistema estrutural ideal, em equilíbrio, com eixo perfeitamente reto, composto por material homogêneo e elástico-linear (HIBBELER, 2018). Quando aplicado um carregamento a esse sistema estrutural, aplicado no centroide da seção transversal P , este sistema voltará à sua posição de equilíbrio inicial (sistema estável), desde que P não exceda o valor P_{cr} . Caso contrário, se $P > P_{cr}$, o sistema se afastará de sua posição original e assumirá uma configuração de equilíbrio deformada (sistema instável), conforme apresentado na Figura 2. Quando $P = P_{cr}$, conforme apresentado na Figura 3, o estado de equilíbrio é neutro e então alcança-se o ponto de bifurcação (BEER et al., 2015).

Figura 1 – Barra indeformada.



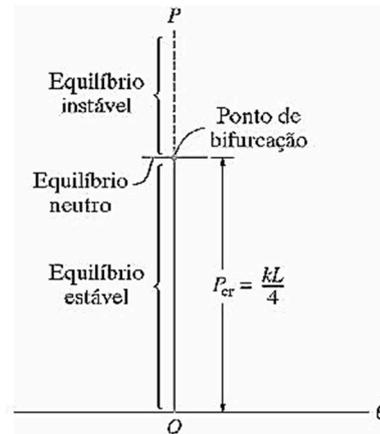
Fonte: BEER et al., (2015).

Figura 2 – Barra deformada.
 $P > P_{cr}$



Fonte: BEER et al., (2015).

Figura 3 - Diagrama de equilíbrio para flambagem de uma estrutura idealizada.



Fonte: HIBBELER (2018).

2.2 Carga crítica para peça comprimida ideal

No século XVIII, o matemático suíço Leonhard Euler, deduziu a fórmula da carga crítica para um sistema ideal, considerando uma barra indeformada, biarticulada, isenta de imperfeições geométricas e tensões residuais, de material com comportamento elástico-linear e sujeito a uma carga axial aplicada no centroide da seção transversal (HIBBLER, 2018). A carga crítica pode ser calculada relacionando o momento interno e a equação diferencial que governa a linha elástica (1). De acordo com a barra da Figura 4, considerando o equilíbrio de corpo livre AQ , o momento fletor (M) no ponto Q , localizado a uma distância x do ponto A , é dado por $-P \cdot y$. Desta forma, substituindo o valor de M em (1), obtém-se (2).

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (1)$$

Em que:

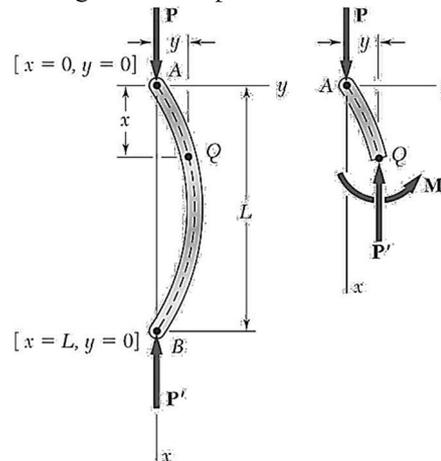
$\frac{d^2y}{dx^2}$ é a segunda derivada de y em relação a x ;

M é o momento fletor em N.mm;

E é o módulo de elasticidade em MPa;

I é o menor momento de inércia para a área da seção transversal em mm^4 .

Figura 4 - Diagrama de corpo livre de barra bi-articulada.



Fonte: BEER et al., (2015).

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{P}{EI}y \quad (2)$$

Onde:

$\frac{d^2y}{dx^2}$ é a segunda derivada de y em relação a x ;

P é a carga axial aplicada em N;

E é o módulo de elasticidade em MPa;

I é o menor momento de inércia para a área da seção transversal em mm^4 ;

y é a deflexão da peça em mm.

Se fizer a seguinte substituição: $\lambda^2 = \frac{P}{EI}$, obter-se-á uma equação diferencial linear homogênea de segunda ordem com coeficientes constantes $\frac{d^2y}{dx^2} + \lambda^2y = 0$. No APÊNDICE A consta o desenvolvimento dessa equação de segunda ordem que determina a menor carga crítica possível, sendo a solução dada por (3).

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3)$$

Em que:

P_{cr} é a máxima carga crítica, imediatamente antes do início da flambagem em N;

E é o módulo de elasticidade em MPa;

I é o menor momento de inércia para a área da seção transversal em mm^4 ;

L é o comprimento real em mm.

O valor da tensão crítica é dado pela razão entre a carga crítica e a área da seção transversal. Pela Equação (3) e fazendo $I = Ar^2$, tem-se: $\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EA}{A.(L/r)^2}$, onde: $\frac{L}{r} = \lambda$.

Substituindo então:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (4)$$

Onde:

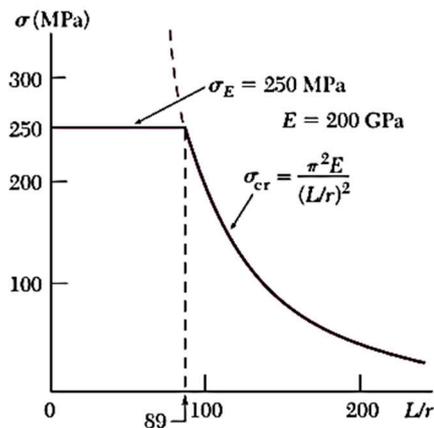
σ_{cr} é a tensão crítica em MPa;

E é o módulo de elasticidade em MPa;

λ é o índice de esbeltez.

É possível observar que a carga crítica é dependente das propriedades geométricas da peça comprimida (I e L) e do módulo de elasticidade do material (E). Além disso, a capacidade de carga de uma peça comprimida será maior à medida que o menor momento de inércia da seção transversal aumentar (BEER, 2015). Dessa forma, de acordo com a Figura 5, a curva de Euler só será válida se a σ_{cr} for menor que a tensão limite de escoamento (σ_E), pois caso contrário, a estrutura romperá por escoamento antes que ocorra a flambagem (GERE, 2010).

Figura 5 – Exemplo de curva de Euler para um aço MR 250.



Fonte: BEER et al., (2015).

O comprimento de flambagem (L_{fl}) é o comprimento entre dois pontos de inflexão onde o momento fletor é nulo (PFEIL e PFEIL, 2003), esse comprimento é dado por (5). Para uma peça comprimida bi-apoiada, como mostra a Figura 4, o comprimento de flambagem (L_{fl}) é igual ao comprimento real (L) e portanto, $k = 1$ (HIBBLER, 2018).

$$L_{fl} = k.L \quad (5)$$

Em que:

L_{fl} é o comprimento de flambagem em mm;

L é o comprimento entre as extremidades bi-rotuladas em mm;

k é o coeficiente de flambagem.

2.3 Carga crítica para barra bi-engastada

Segundo Bedford e Liechti (2020), para determinar o carregamento crítico em uma estrutura bi-engastada, utiliza-se o mesmo método usado na seção 2.2. Desta forma, considerando a barra da Figura 6, com duas extremidades engastadas, sujeita a uma força P , de acordo com o diagrama de corpo livre e substituindo o momento fletor na equação da linha elástica e $\frac{P}{EI}$ por λ^2 , tem-se a Equação (6).

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \lambda^2 y = \frac{V_0}{EI} + \frac{M_0}{EI} \quad (6)$$

Em que:

$\frac{d^2y}{dx^2}$ é a segunda derivada de y em relação a x ;

λ^2 é o termo que substitui $\frac{P}{EI}$;

y é a deflexão da peça em mm;

M_0 é o momento fletor inicial em N.mm;

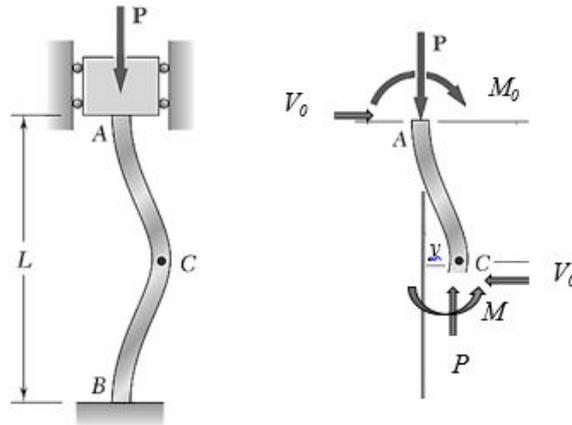
V_0 é a força cortante inicial em N;

E é o módulo de elasticidade em MPa;

I é o menor momento de inércia para a área da seção transversal em mm⁴.



Figura 6 - Diagrama de corpo livre de barra biengastada.



Fonte: BEER et al., (2015).

Essa é uma equação de segunda ordem, cuja solução consta no APÊNDICE B. Desta forma, a menor carga crítica para a condição engaste-engaste é obtida através de (7).

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \quad (7)$$

Onde:

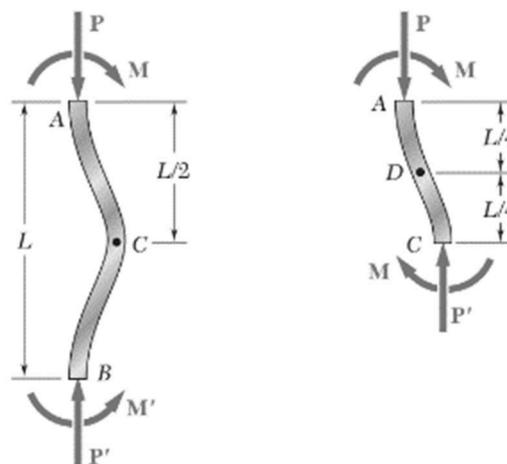
P_{cr} é a máxima carga crítica, imediatamente antes do início da flambagem em N;

E é o módulo de elasticidade em MPa;

I é o menor momento de inércia para a área da seção transversal em mm⁴;

L é o comprimento real em mm.

Figura 7 - Comprimento de flambagem para barra bi-engastada.



Fonte: BEER et al., (2015).

Uma peça comprimida presa por engastes (Figura 7) tem pontos de inflexão à distância $L/4$ de cada apoio. Portanto, o comprimento de flambagem é representado pela metade central de seu comprimento, isto é, $L_{fl} = 0,5L$, dessa forma, $k = 0,5$.

2.4 Carga crítica para barra engastada e apoiada

No caso de uma peça comprimida com uma extremidade engastada B e uma extremidade apoiada A suportando uma força P (Figura 8), deve-se resolver a equação diferencial da linha elástica para determinar o comprimento de flambagem da peça comprimida (Equação 1). No diagrama de corpo livre da peça comprimida (Figura 8), observa-se um esforço cortante (V), momento fletor de segunda ordem (M) e esforço normal (P) no ponto Q, dado por (8).

$$M = P \cdot y - V \cdot x \quad (8)$$

Em que:

M é o momento fletor de segunda ordem em N.mm;

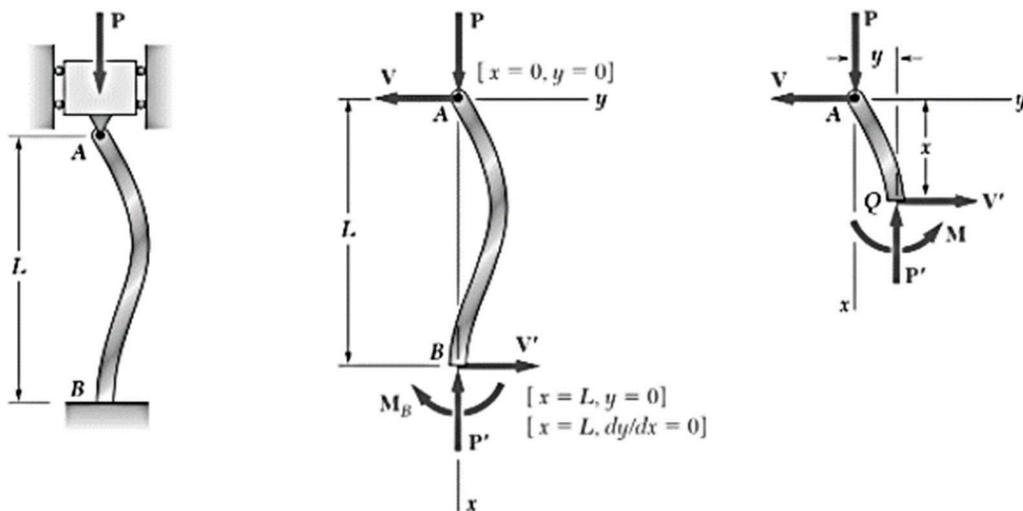
P é a carga axial aplicada em N;

y é a deflexão na direção z em mm;

V é a força cortante em N;

x é a deflexão na direção y em mm;

Figura 8 - Diagrama de corpo livre de barra engastada e apoiada.



Fonte: BEER et al., (2015).

Substituindo (1), constante no subcapítulo 2.1, e fazendo $\lambda^2 = \frac{P}{EI}$, obtém-se (9), sendo uma equação diferencial linear, não homogênea de segunda ordem, com coeficientes constantes, cujo desenvolvimento consta no APÊNDICE C. A solução de (9) resulta em $P_{cr} = \frac{20,19EI}{L^2}$, sendo esta a expressão que permite determinar a carga crítica de Euler para uma barra engastada-apoiada.

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \lambda^2 y = -\frac{Vx}{EI} \quad (9)$$

Em que:

$\frac{d^2y}{dx^2}$ é a segunda derivada de y em relação a x ;

λ^2 é $\frac{P}{EI}$;

y é a deflexão na direção z em mm;

V é a força cortante;

x é a deflexão na direção y em mm;

E é o módulo de elasticidade em N/mm^2 ;

I é o menor momento de inércia para a área da seção transversal em mm^4 ;

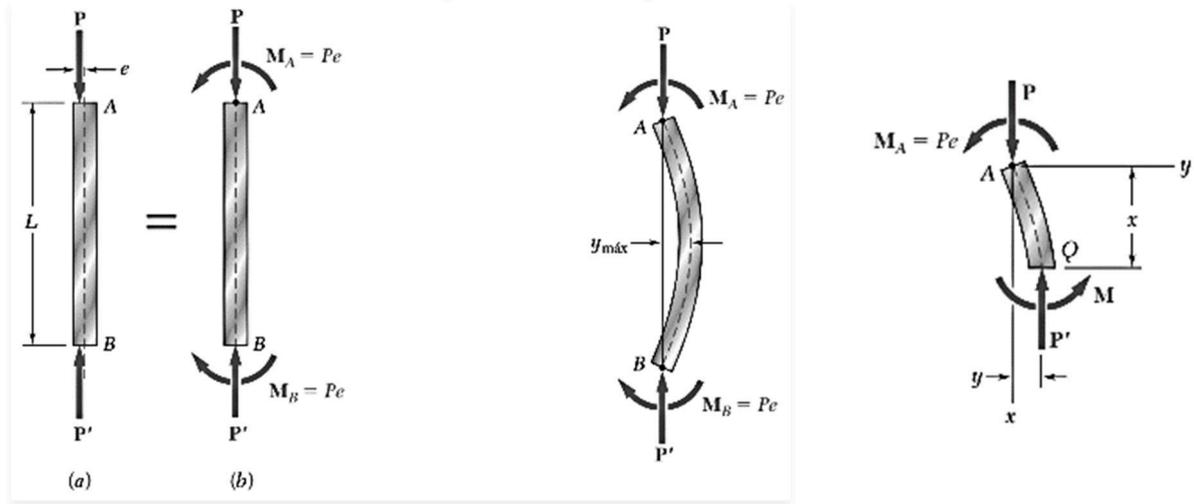
O comprimento de flambagem da peça comprimida é obtido igualando os membros direitos das soluções das equações para peça bi-apoiada e engastada-apoiada: $\frac{\pi^2 EI}{L_{fl}^2} = \frac{20,19EI}{L^2}$. O comprimento de flambagem é $L_{fl} = 0,7 L$, logo o coeficiente de flambagem é $k = 0,7$.

2.5 Fórmula da secante

Para as peças comprimidas reais não são aplicáveis as deduções teóricas de Euler, uma vez que estas são baseadas em peças sem defeitos, compostas por materiais contínuos, geometria retilínea e com carregamento concêntrico (PFEIL, 2003). Em peças comprimidas com imperfeições geométricas e carregamento excêntrico (Figura 9), o processo de flambagem se dá com a flexão inicial da peça comprimida desde o início do carregamento, aumentando gradualmente à medida que a carga se aproxima do valor máximo suportado pela peça (GERE, 2010).



Figura 9 - Peças comprimidas reais



Fonte: BEER et al., (2015).

A força P aplicada na barra não está perfeitamente centrada, causando uma excentricidade (e), que é distância entre a linha de ação de P e o eixo da barra comprimida (Figura 9), causando assim um momento $M_A = P \times e$. Resolvendo pela equação diferencial da linha elástica (1) e de acordo com o diagrama de corpo livre de uma parte A até Q mostrado na Figura 9, conclui-se que o momento fletor (M) é definido por: $M = -P \cdot y - M_A = -P \cdot y - P \cdot e$.

Substituindo o valor de M em (1) e usando a notação $\lambda^2 = \frac{P}{EI}$, obtêm-se (10), cuja solução geral consta no APÊNDICE D. A partir da solução geral obtêm-se a deflexão máxima da barra (11).

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \lambda^2 y = -\lambda^2 e \quad (10)$$

Em que:

$\frac{d^2y}{dx^2}$ é a segunda derivada de y em relação a x ;

λ^2 é $\frac{P}{EI}$;

e é excentricidade em mm;

y é a deflexão da peça em mm;

$$y_{máx} = \left(\sec \left(\frac{L}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}} \right) - 1 \right) \quad (11)$$

Onde:

$y_{m\acute{a}x}$ é a deflexão máxima da peça em mm;

E é o módulo de elasticidade em N/mm²;

I é o menor momento de inércia para a área da seção transversal em mm⁴;

L é o comprimento em mm.

P é a carga axial aplicada em N;

O momento fletor máximo, resultante dos efeitos de primeira ordem (imperfeições geométricas iniciais) e de segunda ordem, ocorre no ponto médio da peça comprimida e pode ser calculado através de (12).

$$M_{m\acute{a}x} = P \cdot e + P \cdot y_{m\acute{a}x} = P \cdot (e + y_{m\acute{a}x}) \quad (12)$$

Onde:

$M_{m\acute{a}x}$ é o momento máximo N.mm;

P é a carga aplicada em N;

e é excentricidade inicial em mm;

$y_{m\acute{a}x}$ é a deflexão máxima em mm;

A tensão máxima $\sigma_{m\acute{a}x}$ ocorre na seção da barra onde o momento é máximo, esta poderá então ser calculada através da fórmula da interação (13), na qual se consideram as tensões normais devidas ao esforço axial e ao momento fletor $M_{m\acute{a}x}$. O momento máximo pode ser substituído por (12) e sabendo que $I = Ar^2$, tem-se:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P}{A} + \frac{M_{m\acute{a}x} \cdot c}{I} = \frac{P}{A} \left[1 + \frac{(e + y_{m\acute{a}x}) \times c}{r^2} \right] \quad (13)$$

Em que:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ é a tensão elástica máxima na peça comprimida, em MPa;

P é a carga vertical aplicada em N;

A é a seção transversal em mm²;

$M_{m\acute{a}x}$ é o momento máximo N.mm;

c é a distância do eixo neutro até a fibra externa da peça em mm;

I é o menor momento de inércia para a área da seção transversal em mm⁴;

e é excentricidade inicial em mm;

$y_{m\acute{a}x}$ é a deflexão máxima em mm;

r é o menor raio de giração em mm;

Substituindo $y_{m\acute{a}x}$ por (11), escreve-se:



$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P}{A} \left[1 + \frac{e.c}{r^2} \operatorname{sec} \frac{L}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}} \right] \quad (14)$$

Substituindo $I = Ar^2$ em (14) e resolvendo para a relação P/A na frente dos colchetes, obtm-se a fórmula da secante:

$$\frac{P}{A} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{1 + \frac{e.c}{r^2} \operatorname{sec} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{P L_{fl}}{EA r}} \right)} \quad (15)$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ é a tensão elástica máxima na peça comprimida em MPa;

P é a carga vertical aplicada em N;

A  a seção transversal em mm²;

e é a excentricidade da força aplicada em mm;

c  a distância do eixo neutro até a fibra externa da peça em mm;

r  o menor raio de giração em mm;

E  o módulo de elasticidade do material em N/mm²;

L_{fl} é o comprimento de flambagem em mm.

A fórmula da secante define a força por unidade de área que provoca uma determinada tensão máxima $\sigma_{m\acute{a}x}$ em uma peça comprimida com um determinado ndice de esbeltez $\frac{L_{fl}}{r}$. Dessa forma, a resistência de uma peça comprimida pode ser representada como sendo função do ndice de esbeltez (BEER, 2015).

A fórmula da secante  precisa para peças submetidas a compressão pura, com defeitos de aplicação da carga, ou seja, aplicação fora do centro geométrico da peça comprimida, porém não considera os problemas inerentes ao material, como a heterogeneidade da madeira e no caso da força aplicada não ser perfeitamente vertical, podendo esta fórmula ser substituída pela fórmula da interação (13), para o cálculo do dimensionamento de peças estruturais (HIBBELER, 2018).

2.6 Ensaios de caracterização física e mecânica

A determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira é realizada através de ensaios de laboratório. As propriedades físicas e mecânicas são influenciadas pela espécie da madeira, defeitos de processamento e de crescimento, como gr inclinada, nós, presença de



medula e faixas de parênquima (DIAS, 2018). No caso dos defeitos de crescimento da madeira, estes são excluídos dos ensaios de caracterização, uma vez que a norma ABNT NBR 7190-3:2022 *Projeto de Estruturas de Madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas* informa que os CPs deverão ser isentos de defeitos.

A mesma norma informa que, para espécies conhecidas, é possível realizar a caracterização simplificada, feita por meio da determinação dos ensaios de resistência à compressão paralela às fibras, onde é admitido o coeficiente de variação de 18% para resistências a esforços normais e para resistências a esforços tangenciais admite-se o coeficiente de 28%. Porém, para espécies pouco conhecidas, é necessário realizar a caracterização completa, que consiste em fazer ensaio de: resistência à compressão paralela à grã ($f_{wc,0}$ ou $f_{c,0}$), módulo de elasticidade na compressão paralela à grã ($E_{c,0}$), resistência à compressão normal à grã ($f_{wc,90}$ ou $f_{c,90}$), ensaio de módulo de elasticidade na compressão normal à grã ($E_{c,90}$), resistência à tração paralela à grã ($f_{wt,0}$ ou $f_{t,0}$), resistência à tração normal à grã ($f_{wt,90}$ ou $f_{t,90}$), resistência ao cisalhamento paralelo à grã ($f_{wv,0}$ ou $f_{v,0}$), resistência ao embutimento paralelo à grã ($f_{e,0}$), resistência ao embutimento normal à grã ($f_{e,90}$), resistência ao fendilhamento ($f_{s,0}$), resistência à flexão (f_M) e densidade aparente (ρ_{ap}), determinada com CPs à 12% de umidade.

Os resultados provenientes dos ensaios laboratoriais poderão ser apresentados em valores médios ou valores característicos. No caso dos valores médios, estes poderão ser comparados com os resultados já obtidos na bibliografia, para um teor de umidade de referência de 12%, considerando a mesma espécie de madeira. Já os valores característicos, estes deverão ser corrigidos para um teor de umidade referência de 12%, com o intuito de enquadrar a espécie de madeira analisada na classe de resistência. Para calcular os valores característicos, é possível recorrer à (16).

$$X_{wk} = \left(2 \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - x_{\frac{n}{2}} \right) \times 1,1 \quad (16)$$

Onde:

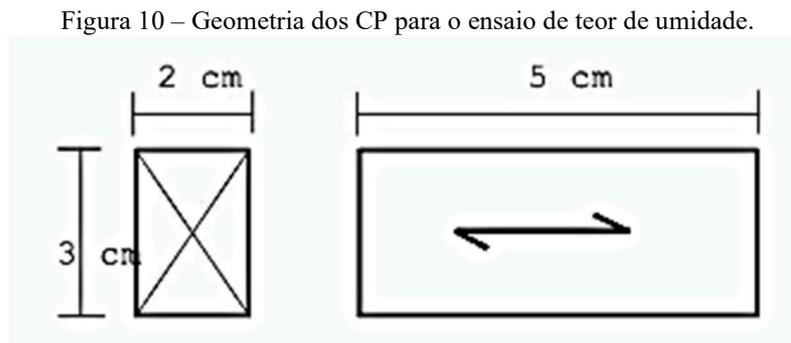
X_{wk} é o valor característico de compressão;

$x_1, x_2 \dots x_n$ são os valores obtidos no ensaio, em ordem crescente.



2.6.1 Teor de umidade

A determinação do teor de umidade de lotes considerados homogêneos de uma peça de madeira é relevante, uma vez que esta propriedade física influencia diretamente as propriedades mecânicas. Além disso, o teor de umidade também influencia o desempenho da peça de madeira quanto à bio-resistência. Desta forma, os CPs deverão apresentar dimensões de (2,0 x 3,0 x 5,0) cm³ conforme apresentado na Figura 10.



Fonte: ABNT NBR 7190-3:2022

Para a determinação do teor de umidade, deve-se obter a massa inicial (m_i) dos CPs, com o auxílio de uma balança com precisão de 0,01g. Após a aferição da massa inicial, os CPs deverão ser colocados em uma estufa com temperatura de $103 \pm 2^\circ \text{C}$. A aferição das massas dos CPs deverá ocorrer a cada 6 horas até que ocorra uma variação entre duas aferições seguidas de 0,5% da última massa aferida. Caso essa diferença seja inferior a 0,5%, o CP é retirado da estufa definitivamente, uma vez que este já atingiu a massa seca (m_s). De posse das massas inicial e seca, o teor de umidade poderá ser calculado através de (17).

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (17)$$

Em que:

$U(\%)$ é o teor de umidade da madeira em %;

m_i é a massa inicial da madeira em g;

m_s é a massa da madeira seca em g.

2.6.2 Densidades aparente e básica

A determinação das densidades aparente e básica devem ser feitas com CPs de dimensões mínimas de (2,0 x 3,0 x 5,0) cm³. Se a distância radial entre anéis de crescimento for acima de 4 mm, a seção transversal deve ser aumentada para incluir no mínimo 5 anéis.

A densidade aparente (ρ_{ap}) é a relação entre massa (m) e o volume (V) com o teor de umidade no qual o CP se encontra, sendo dada por (18). A norma ABNT NBR 7190-3:2022 refere que, para efeitos de comparação, a densidade aparente de referência deverá ser obtida para um teor de umidade do CP igual a 12%.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (18)$$

Onde:

ρ_{ap} é a densidade básica em kg/m³;

m_{12} é a massa a 12% de umidade em kg;

V_{12} é o volume a 12% de umidade em m³.

Para determinar a densidade básica (ρ_{bas}), é necessário considerar a massa seca (m_s) e o volume saturado (V_{sat}). A massa seca é determinada mantendo os corpos de prova em estufa à temperatura de 103°, até que a massa se mantenha constante, enquanto que o volume saturado, é obtido mantendo os CPs submersos em água, até que atinja peso constante. Desta forma, a densidade básica poderá ser obtida através da razão entre a massa seca (m_s) e o volume saturado (V_{sat}) dos CPs (19).

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (19)$$

Onde:

ρ_{bas} é a densidade básica em kg/m³;

m_s é a massa seca em kg;

V_{sat} é o volume saturado em m³.

Os valores de densidade aparente e básica são apresentados na forma de valores médios, onde este é determinado pela média aritmética dos resultados obtidos (20):

$$X_m = \frac{\sum_i^n x_i}{n} \quad (20)$$

Onde:

$\sum_i^n x_i$ é o somatório dos resultados obtidos no ensaio;



n é o número de resultados obtidos.

Segundo Dias (2018), a madeira pode ser classificada a partir do conhecimento da sua densidade. Madeiras com densidade até $0,55\text{g/cm}^3$ são classificadas como leves ou de baixa densidade, para densidades entre $0,55$ e $0,72\text{g/cm}^3$ são classificadas como de média densidade e para valores acima de $0,72\text{g/cm}^3$, a madeira é classificada como pesada ou de alta densidade.

2.6.3 Resistência e rigidez à compressão paralela à grã

O ensaio de determinação da resistência à compressão paralela à grã (f_{c0}) e do módulo de elasticidade à compressão paralela à grã (E_{c0}), conforme as normas ABNT NBR 7190:1997 e ABNT NBR 7190-3:2022, requer que o carregamento seja aplicado com uma taxa de 10MPa/min . A resistência a compressão paralela à grã ($f_{wc,0}$ ou f_{c0}) é a máxima tensão de compressão que um CP de $(5,0 \times 5,0 \times 15,0)\text{cm}^3$ pode resistir ao ser solicitada, sendo expressa por (21).

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,m\acute{a}x}}{A} \quad (21)$$

Onde:

f_{c0} é a resistência a compressão paralela à grã em MPa;

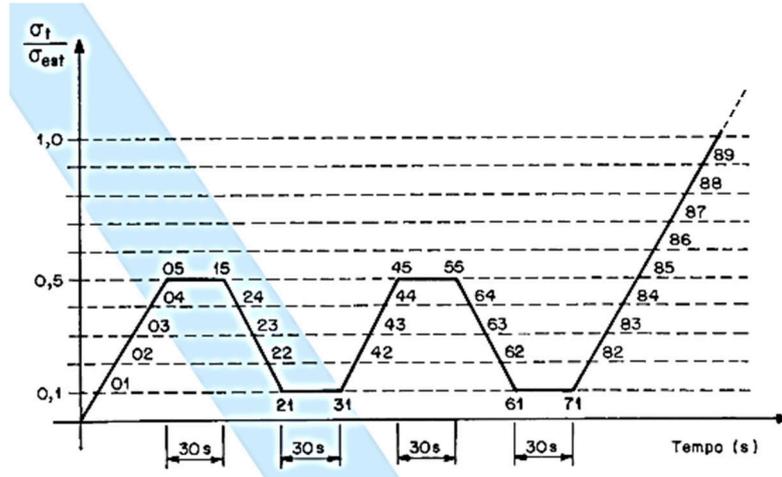
$F_{c0,m\acute{a}x}$ é a força máxima de compressão paralela à grã em N;

A é a área da seção transversal do CP em mm^2 .

De forma a obter-se o módulo de elasticidade à compressão paralela à grã, o carregamento, segundo a norma ABNT NBR 7190:1997 deverá apresentar dois ciclos de carga/descarga antes de realizar o carregamento que provocará a ruptura, conforme a Figura 11. Já a norma ABNT NBR 7190-3:2022 apresenta apenas um ciclo de carga/descarga antes de ocorrer a ruptura (Figura 12).

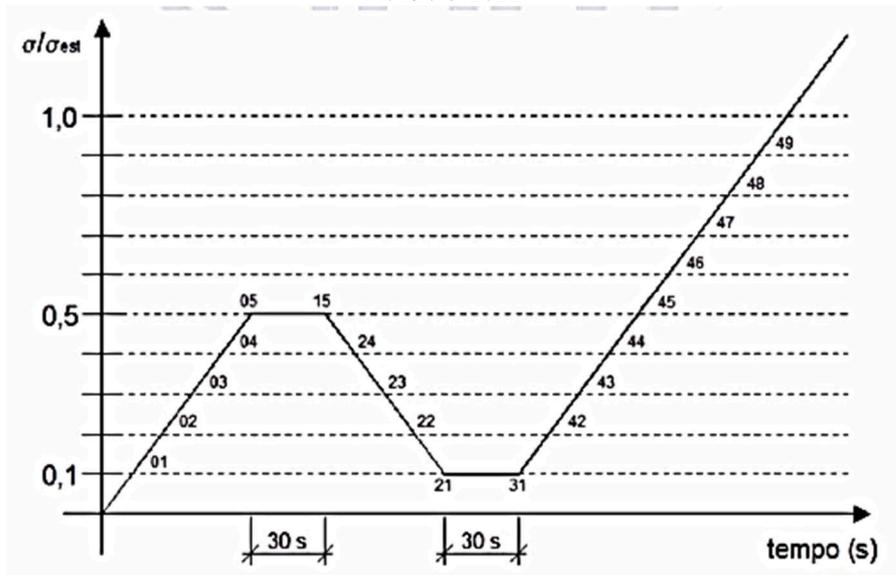


Figura 11 – Diagrama do carregamento para determinação da rigidez à compressão segundo a ABNT NBR 7190:1997.



Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Figura 12 – Diagrama do carregamento para determinação da rigidez à compressão segundo a ABNT NBR 7190-3:2022.



Fonte: ABNT NBR 7190-3:2022

Para determinar o valor do módulo de elasticidade à compressão paralela à grã, as medidas de deformação devem ser feitas no mínimo em duas faces opostas do CP, podendo ser utilizado relógios comparadores com precisão de 0,001 milímetros para a medição. O módulo de elasticidade à compressão paralela à grã é calculado a partir da inclinação da reta secante à curva tensão x deformação (Figura 13), definida pelos pontos $\sigma_{10\%} - \epsilon_{10\%}$ e $\sigma_{50\%} - \epsilon_{50\%}$, que correspondem a 10% e 50% da resistência à compressão paralela à grã e deformação medida paralelamente à grã, respectivamente, podendo ser expressa por (22).

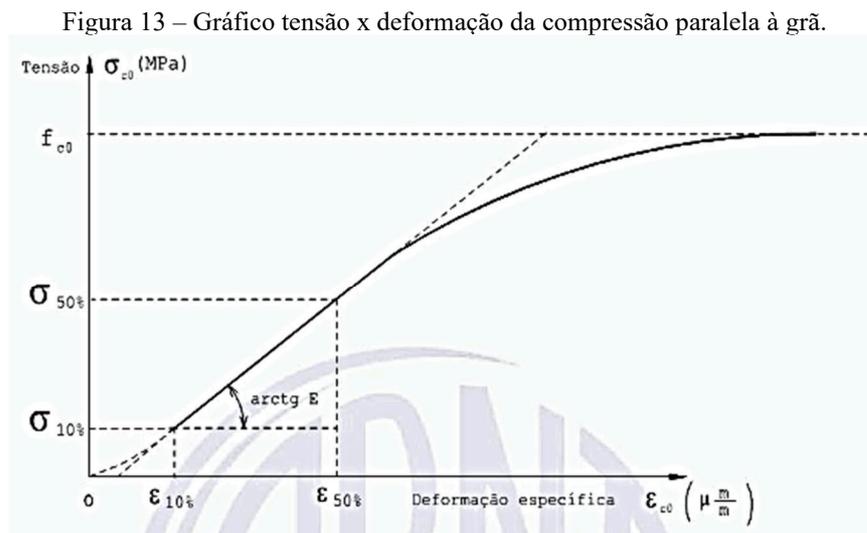
$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (22)$$

Em que:

E_{c0} é o módulo de elasticidade a compressão;

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ correspondem respectivamente a 10% e 50% do valor de f_{c0} .

$\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ correspondem às deformações nos pontos de $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.



Fonte: ABNT NBR 7190-3:2022

Os valores de resistência à compressão paralela à grã e do módulo de elasticidade à compressão paralela à grã devem ser apresentados em forma de valores característicos e médios.

2.7 A madeira de paricá

Segundo Trianoski et al. (2014), a escassez de madeira com qualidade adequada para uso estrutural é um dos principais problemas encontrados pela construção civil, advindo do uso excessivo de algumas espécies. Tais fatores geram a necessidade de avaliar o potencial de espécies alternativas provenientes de reflorestamento, de forma a aliviar a pressão sobre as espécies nativas tradicionalmente utilizadas na construção civil (COSTA et al., 2017).

Para Modes et al. (2020), a alta demanda por produtos florestais madeireiros provenientes de reflorestamento levou os empresários do setor florestal e madeireiro a investir em espécies alternativas, tais como o paricá (*Schizolobium Amazonicum*). O paricá é uma espécie amazônica de grande potencial econômico, que tem conquistado cada vez mais

destaque entre as espécies reflorestadas no Brasil, pois apresenta poucos defeitos naturais e uma taxa de crescimento que possibilita a sua utilização em poucos anos (ALMEIDA et al., 2013).

De acordo com dados do Ibá (2019), estima-se que em 2018, a área de plantio de paricá era de 90811ha, ocupando a 6º posição entre culturas florestais plantadas no Brasil. Pode alcançar uma produção volumétrica de 38 m³/ha/ano (PEREIRA, 2017) mesmo sem a adoção de programas de melhoramento, comumente utilizados nos plantios em larga escala no Brasil (VIDAURRE, 2012).

Para Silveira et al. (2017), os plantios comerciais existentes com esta espécie são justificados pela boa aceitação no mercado madeireiro, devido à facilidade de remoção da casca, laminação, secagem, prensagem e acabamento, permitindo a produção de material com acabamento sedoso. O paricá possui densidade em torno de 300 kg/m³, sendo caracterizada como madeira leve. Um dos setores econômicos para a utilização da madeira é a construção civil (ALMEIDA et al., 2013), sendo adequada para a fabricação de forros, laminados e compensados (NASCIMENTO et al., 2022).

Segundo Almeida et al. (2013), a utilização da madeira de paricá como componente estrutural depende do conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas, o qual permitirá utilizar esse material de forma racional, empregando-o de maneira correta nas edificações.

2.7.1 Propriedades físicas do paricá

De acordo com Santos (2013), as propriedades ligadas ao comportamento físico da madeira, são as que mais apresentam influência sobre as suas propriedades mecânicas. As propriedades físicas podem apresentar variações que se devem às diferenças na estrutura anatômica da madeira e na quantidade de substâncias extrativas presentes por unidade de volume, em função principalmente, da idade e condições de crescimento da árvore, posicionamento em relação ao tronco do qual foi extraída a tora, clima, localização geográfica e tratos silviculturais (SILVA et al., 2016).

Colli (2007), trabalhou na caracterização da madeira de paricá (*Schyzolobium amazonicum* Huber ex. Ducke), de plantios do Centro de Pesquisa do Paricá (CPP), no município de Dom Eliseu-PA, em diferentes idades (5, 7, 9 e 11 anos), onde concluiu que o paricá é uma madeira leve, de baixa densidade, com densidade aparente de 280 kg/ m³. Cavalheiro (2014), avaliando o desempenho da mesma madeira para utilização em madeira laminada colada (MLC), obteve a densidade aparente média de 370 kg/ m³.



Iwakiri et al. (2010) avaliou o potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* “Paricá” e *Cecropia hololeuca* “Embaúba” para produção de painéis cimento-madeira, encontrando a densidade aparente de 320 kg/m³ e Melo et al. (2013), analisando a qualidade de lâminas produzidas com a madeira de paricá, verificou que essa espécie apresenta coloração branco-acinzentada e a mesma densidade aparente encontrada por Iwakiri et al. (2010). Já Moritani (2018), propondo classes de resistência de três espécies de madeira de floresta plantada (*Eucalyptus urograndis*, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum*) para uso estrutural, encontrou a densidade aparente de 325 kg/m³.

Almeida et al. (2013), determinaram as propriedades de resistência e rigidez de peças da madeira paricá em dimensões estruturais, de acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997, para esse estudo encontraram densidades aparente e básica de 370 kg/m³ e 300 kg/m³, respectivamente, classificando o paricá como madeira de baixa densidade. Figueroa (2008), determinou a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas da mesma espécie, oriunda de florestas plantadas da região amazônica, e obteve valores de densidade aparente de 331 kg/m³.

Macedo et al. (2012) trabalharam na caracterização de algumas das propriedades físicas da espécie de paricá, sendo a densidade aparente encontrada de 338,59 kg/m³ e densidade básica de 282,20 kg/m³. Já Mascarenhas (2015), estudando indicadores de qualidade ambiental e caracterização tecnológica da madeira em sistema agroflorestal multiestratificado, caracterizou físico e mecanicamente o paricá, encontrando as densidades aparente e básica, de 350 kg/m³ e 280 kg/m³, respectivamente.

Modes et al. (2020), em seus estudos avaliaram a variação longitudinal da densidade básica e da densidade aparente, de paricá aos 14 anos de idade, de duas áreas de florestas plantadas no estado de Rondônia, encontrando uma média de 310 kg/m³ e 370 kg/m³, respectivamente, ambas com tendência de redução ao longo da porção longitudinal avaliada. Moreira (1999), estudando as propriedades físico-mecânicas, características anatômicas e químicas de 23 espécies de madeira, encontrou densidade aparente de 440 kg/m³ e densidade básica de 380 kg/m³ para a madeira de paricá.

Rosa et al. (2019), avaliando o desempenho de madeiras laminada (MLC) de paricá reforçadas com fibras de vidro e carbono coladas com adesivo resorcinol através de ensaios de resistência física e mecânica, com o teor médio de umidade da madeira de paricá de 13,87%, obteve densidades básica e aparente de 340 kg/m³ e 410 kg/m³, respectivamente.

Bianche et al. (2012), avaliaram as propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*) e paricá (*Schizolobium amazonicum*) em



associação com vassoura (*Sida spp.*), obtendo o valor de 260 kg/m³ para a densidade básica de paricá. Jesus (2004), caracterizando anatômica e fisicamente a madeira paricá, plantado em dois espaçamentos e dois ambientes, em áreas da empresa Tramontina, no município de Aurora do Pará-PA, obteve a média de densidade básica de 290 kg/m³. Já Machado et al. (2018), avaliando a viabilidade técnica de utilização das madeiras de paricá (*Schizolobium amazonicum Huber ex. Ducke*) e embaúba (*Cecropia palmata Willd*) para produção de lâminas de madeiras de painéis compensados de uso externo no município de Dom Eliseu-PA, obteve densidade básica média da madeira de paricá de 280 kg/m³.

Silva et al. (2016), avaliando as características anatômicas e físicas da madeira de paricá, de ocorrência natural do estado do Pará, encontraram a média geral para densidade básica de 330 kg/m³. Terezo et al. (2015) avaliando as propriedades físicas e mecânicas de paricá com 6, 10, 19 e 28 anos de idade, provenientes dos municípios de Aurora e Tomé-açu do Pará, verificaram que o material analisado, apresentou densidade básica média de 327,99 kg/m³, 347,47 kg/m³, 272,87 kg/m³ e 296,26 kg/m³, para as idades de 6, 10, 19 e 28 anos, respectivamente. Já Vidaurre et al. (2018), determinando as propriedades físicas e mecânicas da madeira da espécie de paricá coletadas de plantações comerciais localizadas no norte do Brasil com idades de 5 anos, 7, 9 e 11 anos, encontrou densidade básica média de 280 kg/m³, caracterizando a madeira como de baixa densidade.

2.7.2 Propriedades mecânicas do paricá

Almeida et al. (2013), determinaram as propriedades de resistência e rigidez de peças da madeira Paricá em dimensões estruturais, com 10 anos de idade. Para esse estudo encontraram uma resistência à compressão paralela à grã média de 24 MPa e módulo de elasticidade paralelo à grã médio de 7320 MPa. Cavalheiro et al. (2014), estudando a mesma propriedade em seu estudo sobre propriedades mecânicas da madeira da espécie paricá, utilizando corpos de prova estruturais, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7190, obteve resistência à compressão paralela à grã média de 25 MPa. Já Figueroa e Moraes (2016), avaliando do efeito da temperatura na resistência à compressão paralela ao grã, obteve o valor de 32 MPa.

Mascarenhas (2015), caracterizando mecanicamente o paricá em seu estudo já citado (vide 2.8.1), obteve o valor de 22,66 MPa para a resistência à compressão paralela à grã média. Modes et al. (2020), em seus estudos avaliaram a variação longitudinal da densidade



básica, densidade aparente e variação radial das propriedades mecânicas de paricá aos 14 anos de idade, encontraram uma média de 27,21 MPa para resistência à compressão paralela ao grã.

Terezo et al. (2015), avaliando as propriedades mecânicas da madeira de paricá com 6, 10, 19 e 28 anos de idade, verificaram que, com idade de 6 anos o paricá possuía uma resistência à compressão paralela à grã média de 30,84 MPa. Para as demais idades, os autores obtiveram, 20,05 MPa, 21,40 MPa e 22,08 MPa para 10, 19 e 28 anos, respectivamente. Já para o módulo de elasticidade à compressão paralela à grã, obtiveram 11.418,09 MPa, 10.479,19 MPa, 11.751,65 MPa e 10.582,63 MPa, para as idades em ordem crescente.

Moreira (1999), em seu trabalho sobre as propriedades físico-mecânicas, características anatômicas e químicas de 23 espécies de madeira, entre elas, o paricá já supracitado no subcapítulo 2.8.1, apresentou uma resistência à compressão paralela ao grã de 36,50 MPa. Moritani (2018), propondo classes de resistência de três espécies de madeira de floresta plantada, obteve 25,51 MPa para a mesma resistência mecânica citada anteriormente da madeira de paricá e Vidaurre et al. (2018), em seu trabalho com paricá em idades de 5 anos, 7, 9 e 11 anos, encontrou para propriedade mecânica, a resistência a compressão paralela à grã de 22,70 MPa e módulo de elasticidade de 5,811 MPa.



3 METODOLOGIA

Para determinar as propriedades físicas, mecânicas e o ensaio de compressão de peças esbeltas, foram utilizados CPs obtidos a partir de 5 toras de madeira de paricá, com idade de 5 anos, provenientes de plantios localizados no município de Rondon do Pará. As toras foram selecionadas aleatoriamente do pátio de estocagem e doadas pela empresa Mapri Compensados, localizada em Itinga – Maranhão, no dia 04 de março de 2021.

As toras tinham dimensões de 20 cm diâmetro e 2,20 m de comprimento. Cada tora foi serrada na direção diametral com o auxílio de motosserra, originando duas peças com seção semi-circular. Este procedimento foi realizado com o objetivo de facilitar o seu transporte e armazenamento no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção – LEMATCON – Timoshenko da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL), localizado no campus de Açailândia – MA, onde ocorreram todos os ensaios.

Devido à limitação dimensional das toras, selecionaram-se quatro das cinco toras para se obter – de cada uma – 12 CPs para o ensaio de determinação do teor de umidade (U) e densidade aparente (ρ_{ap}) e 12 CPs para o ensaio de resistência à compressão paralela à grã (f_{c0}). A partir da quinta tora, foram confeccionados 12 CPs para a determinação da densidade básica ($\rho_{bás}$), 6 CPs para a determinação do módulo de elasticidade à compressão paralela à grã (E_{c0}) e 90 CPs para o ensaio de compressão de peças esbeltas.

Todos os ensaios físicos e mecânicos foram executados conforme o Anexo B da norma ABNT NBR 7190-3:2022 – *Projeto de Estruturas de Madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas* (Tabela 1), exceto a determinação do teor de umidade que, neste caso, considerou as aferições das massas em intervalos de tempo de 24 horas, de acordo com metodologia adotada por Silva et al. (2019).

Tabela 1 - Dimensões dos CPs das caracterizações física e mecânica e taxas de carregamento utilizadas.

Propriedade	n° total de CPs	largura (cm)	altura (cm)	comprimento* (cm)	taxa de carregamento (MPa/min)
U (%)	48	2,93	1,91	5,06	-
ρ_{ap} (kg.m ⁻³)	48	2,93	1,91	5,06	-
f_{c0} (MPa)	48	4,90	4,73	15,24	10,00
E_{c0} (MPa)	6	5,06	5,06	14,82	10,00
$\rho_{bás}$ (kg.m ⁻³)	12	3,01	2,08	5,03	-

*medido na direção da grã. U: teor de umidade; ρ_{ap} : densidade aparente; f_{c0} : resistência à compressão paralela à grã; E_{c0} : módulo de elasticidade à compressão paralela à grã e $\rho_{bás}$: densidade básica. Fonte: A autora.



A metodologia está organizada em três subcapítulos: caracterização física do paricá, nomeadamente, ensaios de teor de umidade (U), densidade aparente (ρ_{ap}) e densidade básica (ρ_{bas}); ensaios de caracterização mecânica do paricá: resistência à compressão paralela à grã ($f_{c,0}$) e módulo de elasticidade na compressão paralela à grã ($E_{c,0}$), além disso, o ensaio de compressão de peças esbeltas.

3.1 Ensaio de caracterização física

Para a determinação do teor de umidade e densidade aparente, foram confeccionados 12 CPs de cada uma das quatro toras, com dimensões médias apresentadas na Tabela 1. Inicialmente, os CPs tiveram suas dimensões aferidas com o uso de um paquímetro analógico STORM. Após isso, foram introduzidos em uma estufa de secagem da marca Lucademia, modelo 80/100, tendo sido submetidos a uma temperatura de $103 \pm 2^\circ \text{C}$. As massas foram aferidas com o auxílio de uma balança de precisão da marca Bel, modelo S622, até se obter uma variação de massa inferior ou igual a 0,5% entre dois resultados consecutivos, conforme a metodologia preconizada pela norma ABNT NBR 7190-3:2022, porém, o tempo entre as aferições das massas seguiu a metodologia adotada por Silva et al. (2019), onde foram feitas em intervalos de tempo de 24 horas, devido à disponibilidade do laboratório.

De posse das massas inicial e seca, o teor de umidade foi calculado através da (17), constante na seção 2.6.1, já a densidade aparente foi obtida pela relação entre massa (m) e volume (V) com o teor de umidade a 12%, sendo dada por (18), que consta na seção 2.6.2.

Para a aferição da densidade básica, foram confeccionados 12 CPs da tora 5, com dimensões médias apresentadas na Tabela 1. O ensaio seguiu a metodologia presente na norma ABNT NBR 7190-3:2022, tendo sido utilizados os mesmos instrumentos e equipamentos já supracitados, sendo que os CPs foram imersos em água por um período que permitisse obter uma variação de massa inferior ou igual a 0,5% entre dois resultados consecutivos, sendo então este o volume saturado. A densidade básica foi obtida através da razão entre a massa seca (m_s) e o volume saturado (V_{sat}) dos CPs, de acordo com (19), que consta na seção 2.6.2.

Tratando-se de toras que foram obtidas aleatoriamente do pátio de estocagem da empresa de compensados supracitada, procedeu-se à análise da homogeneidade dos resultados obtidos através de testes de Tukey, para verificar se existe diferença estatística entre os valores de teor de umidade e densidade aparente obtidos para as toras 1, 2, 3 e 4.



3.2 Ensaio de caracterização mecânica

Para a determinação da resistência à compressão paralela à grã foram utilizados 12 CPs de cada uma das quatro toras, com dimensões conforme mostra a Tabela 1. Para a realização do mesmo ensaio, foi utilizada uma máquina universal INSTRON EMIC 23-100 com seus acessórios, seguindo a metodologia de ensaio prescrita na norma ABNT NBR 7190-3:2022, tendo sido utilizadas a taxa de carregamento apresentada na Tabela 1.

Na determinação do módulo de elasticidade à compressão paralela à grã, foram utilizados 6 CPs da quinta tora, com dimensões e taxa de carregamento de acordo com a Tabela 1. Para esse ensaio, foi utilizada uma máquina universal INSTRON EMIC 23-100, acrescentado de um extensômetro capaz de medir as deformações mecânicas nos CPs.

O carregamento para o módulo de elasticidade à compressão paralela à grã, segundo a norma ABNT NBR 7190:1997 deve apresentar dois ciclos de carga/descarga antes de realizar o carregamento que provoca a ruptura, já a norma ABNT NBR 7190-3:2022 apresenta apenas um ciclo de carga/descarga antes de ocorrer a mesma ruptura.

No momento em que este trabalho estava sendo escrito, a norma ABNT NBR 7190:1997 deixou de estar em vigor, sendo revogada pela ABNT NBR 7190-3:2022. No entanto, uma vez que, no momento dos ensaios, a norma em vigor continha a versão de 1997, foi adotada a metodologia que continha dois ciclos de carga/descarga.

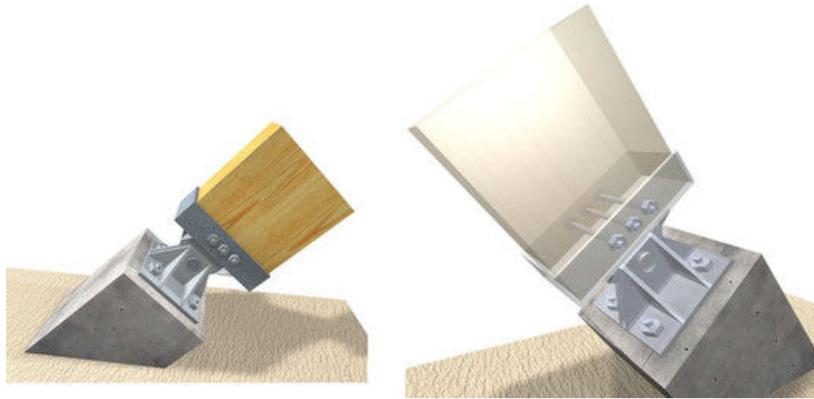
Para verificação da homogeneidade do lote usado para definir a propriedade mecânica de resistência à compressão paralela à grã, foram analisados os Coeficientes de Variação, conforme preconizado pela norma ABNT NBR 7190-3:2022.

3.3 Ensaio de compressão de peças esbeltas

O ensaio de compressão de peças esbeltas foi dividido em três condições de apoio, sendo elas: AA, EE e EA. Essas vinculações externas simulam três situações encontradas frequentemente nas estruturas de madeira com ligações mecânicas ou coladas. A condição de vinculação apoiada (AA) é uma idealização estrutural que permite representar situações nas quais o elemento estrutural possui ligações que não apresentam rigidez à rotação (Figura 14) nas suas extremidades. A vinculação engaste (EE) é referente a ligações que possuem rigidez total à rotação (Figura 15).

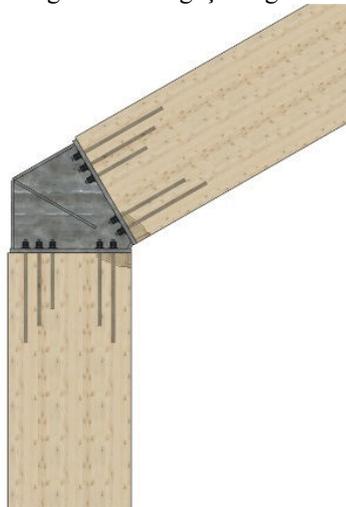


Figura 14 – Ligação sem rigidez à rotação.



Fonte: ArchDaily Brasil, 2017.

Figura 15 – Ligação rígida.



Fonte: Adaptado por Raphael Bouchard de Buchanan e Fairweather (1993).

Para o ensaio de compressão de peças esbeltas foram utilizados 30 CPs para cada situação de apoio, totalizando 90 unidades. Todos os CPs foram retirados da quinta tora de paricá e possuíam dimensões de $(2,0 \times 0,3 \times 31,0)$ cm³. As dimensões dos CPs foram determinadas de acordo com as limitações apresentadas pela máquina universal de ensaios utilizada quanto à espessura, largura e comprimento. A espessura de cada CP foi limitada pela abertura máxima dos mordentes, sendo esta dimensão igual a 0,3 cm, conforme representado na Figura 16. A dimensão de 2,0 cm do CP foi definida em função da largura dos mordentes.

O comprimento dos CPs foi determinado pelo valor mínimo necessário para que a ocorrência do fenômeno de flambagem fosse determinante para o colapso da peça, atendendo à seção transversal estipulada em função das limitações do equipamento de ensaio. Assim sendo, com base nos valores mínimos do módulo de elasticidade à compressão à grã e da resistência à compressão paralela às fibras, obtidos através da metodologia presente em 3.2, estipulou-se um

comprimento de 31,0 cm (APÊNDICE E). Este valor é superior ao valor calculado através das condições de colapso (flambagem – através da carga crítica de Euler – e ruptura por compressão paralela às fibras) igual a 23,7 cm. Foi adotado o valor de 31,0 cm, para evitar que a variabilidade do desempenho mecânico da madeira pudesse evitar o colapso por flambagem e para considerar o comprimento do CP abrangido pelos mordentes.

Figura 16 - Mordentes da prensa hidráulica.



Fonte: A autora

Figura 17 - CP com extremidades bi-apoiadas.



Fonte: A autora

Figura 18 - CP com extremidade engastada-apoiada.



Fonte: A autora

A velocidade de ensaio adotada foi de 10 MPa/min, uma vez que é a taxa de carregamento prevista na norma ABNT NBR 7190-3:2022 para o ensaio de resistência à compressão paralela à grã. Esta velocidade de ensaio é equivalente a 600 N/min (vide APÊNDICE F). Para encontrar o coeficiente de flambagem, em função de cada tipo de apoio, foi usada a fórmula da carga crítica de Euler (Equação 23).

$$k = \sqrt{\frac{\pi^2 \times E \times I}{P_{cr} \times L^2}} \quad (23)$$

Onde:

k é o coeficiente de flambagem.

E é o módulo de elasticidade à compressão paralela à grã em MPa;

I é o menor momento de inércia para a área da seção transversal em mm⁴;

P_{cr} é a força máxima obtida imediatamente antes do início da flambagem em N;

L é o comprimento livre do CP em mm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização física

Os resultados obtidos para a caracterização física da madeira de paricá foram publicados em Lima et al. (2022b). Por conseguinte, a Tabela 2 apresenta os resultados relativos ao teor de umidade e densidade aparente para as quatro toras, como também a densidade básica para a quinta tora.

Os valores médios dos teores de umidade das quatro toras apontam valores compreendidos entre 10,12% a 10,72%. Para analisar a homogeneidade dos resultados, o teste de Tukey apresentado na Tabela 3, afirma que não existe diferença estatística entre os teores de umidade obtidos para as quatro toras. Essa ocorrência poderá ser explicada pelo fato de as quatro toras terem sido armazenadas no mesmo laboratório (LEMATCON), estando protegidas da incidência de sol e chuvas pelo fato de estarem no interior de uma edificação.

Para a tora 5, foi verificado um valor médio de 12,28%, já que os CPs desta tora foram ensaiados posteriormente, em dezembro de 2021, sendo que, este é um mês de alta pluviosidade segundo o Climatempo (2022), e, dessa forma, o teor de umidade da madeira tende a ser maior. Em qualquer dos casos, o teor de umidade da madeira em análise, se encontra na classe de umidade 1 da norma ABNT NBR 7190-1:2022 – *Projeto de Estruturas de Madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento*, já que o teor de umidade médio das cinco toras foi de 11,33%.

Tabela 2 - Propriedades físicas da madeira de paricá.

	Tora 1		Tora 2		Tora 3		Tora 4		Tora 5
	U (%)	ρ_{ap} (kg/m ³)							
n° CPs	12		12		12		12		12
Máximo	10,63	268,37	11,26	297,13	10,87	295,22	10,56	342,08	249,69
Média	10,12	247,24	10,72	258,51	10,39	261,87	10,29	334,65	236,42
Mínimo	9,59	229,62	10,38	233,78	9,62	231,28	9,89	324,69	220,67
CV (%)	3,19	4,72	2,32	6,11	3,77	8,84	2,14	1,53	4,24

n° CPs = número de corpos de prova; CV = Coeficiente de variação; U = Teor de umidade; ρ_{ap} = Densidade aparente; $\rho_{bás}$ = Densidade básica. Fonte: Lima et al. (2022).



Tabela 3 - Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para o teor de umidade.

	\overline{U}_1	\overline{U}_2	\overline{U}_3	\overline{U}_4
\overline{U}_1	-	0,330	0,263	0,170
\overline{U}_2	-	-	0,327	0,328
\overline{U}_3	-	-	-	0,093
\overline{U}_4	-	-	-	-

\overline{U}_1 , \overline{U}_2 , \overline{U}_3 e \overline{U}_4 são as médias dos teores de umidade das toras 1, 2, 3 e 4, respectivamente; resultados inferiores a 0,331 indicam diferenças não significativas para o nível de 5% de probabilidade. Fonte: Lima et al. (2022).

O menor valor identificado para a densidade aparente foi igual a 229,62 kg.m⁻³, já o maior valor foi de 342,08 kg.m⁻³ e o valor médio das quatro toras igual a 275,57 kg.m⁻³. Para constatar a homogeneidade dos resultados relativos à densidade aparente das toras 1, 2, 3 e 4, realizou-se o teste de Tukey com 5% de significância (Tabela 4). Como pode ser visto pelos resultados obtidos, apenas a tora 4 apresentou diferenças significativas em relação as demais toras. A divergência de densidades aparentes pode ser diretamente relacionada com a posição em relação ao tronco do qual foi retirada a tora, além das condições de crescimento da árvore. Entretanto, apesar da diferença dada pelo teste de Tukey, a amostra de madeira em análise não ultrapassa o valor de 550 kg.m⁻³, sendo este o valor limite de densidade aparente para as madeiras de baixa densidade (SILVA, VALE E MIGUEL, 2015).

Tabela 4 - Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a densidade aparente.

	$\overline{\rho}_{ap1}$	$\overline{\rho}_{ap2}$	$\overline{\rho}_{ap3}$	$\overline{\rho}_{ap4}$
$\overline{\rho}_{ap1}$	-	11,276	14,630	87,414
$\overline{\rho}_{ap2}$	-	-	3,354	76,138
$\overline{\rho}_{ap3}$	-	-	-	72,784
$\overline{\rho}_{ap4}$	-	-	-	-

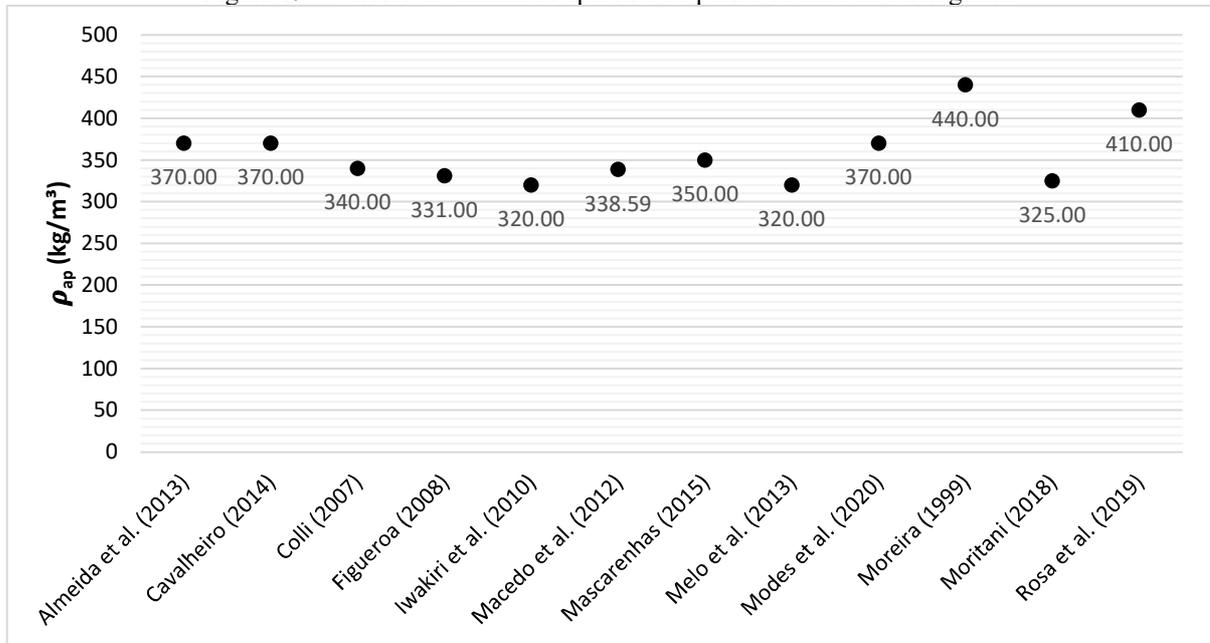
$\overline{\rho}_{ap1}$, $\overline{\rho}_{ap2}$, $\overline{\rho}_{ap3}$ e $\overline{\rho}_{ap4}$ = são as médias das densidades aparentes das toras 1, 2, 3 e 4, respectivamente; resultados inferiores a 16,84 indicam diferenças não significativas para o nível de 5% de probabilidade. Fonte: Lima et al. (2022).

Em relação aos resultados obtidos para a densidade aparente, segundo Dias (2018), a madeira em análise se enquadra como sendo de baixa densidade, o que confirma as afirmações de Melo e Del Menezzi (2014), nas quais a madeira de paricá é uma madeira de baixa densidade e clara, sendo sua densidade inferior a 400 kg.m⁻³. A Figura 19 apresenta os valores obtidos na bibliografia analisada em comparação com outros trabalhos de caracterização física da madeira de paricá. Pode-se verificar que o valor médio obtido neste estudo (275,57 kg.m⁻³) é cerca de 37,37% inferior em relação ao estudo de Moreira (1999) e 13,88 % inferior no que se refere ao trabalho de Melo et al. (2013). Em geral, a madeira analisada no presente estudo está abaixo dos resultados de valores médios obtidos pelos outros estudos.



De acordo com Silva et al. (2020), a densidade aparente está diretamente relacionada com as espessuras das paredes celulares da madeira que, por sua vez, variam segundo as condições de crescimento da árvore, tais como: exposição solar, qualidade do solo e pluviosidade (ROCHA, 1994). Em contrapartida, Terezo et al. (2015) mencionam que a densidade aparente é proporcional à idade das células, portanto, a idade da madeira analisada (5 anos) pode ser a base para a diferença analisada. Os mesmos autores referem que a relação entre a idade e a densidade da madeira é de difícil determinação, devido às condições de crescimento das árvores. Deste modo, as densidades aparentes apresentaram valores de 327,99 kg.m⁻³ para 6 anos, 347,47 kg.m⁻³ para 10 anos, 272,87 kg.m⁻³ para 19 anos e 296,26 kg.m⁻³ para 28 anos.

Figura 19 - Valores de densidade aparente do paricá obtidos na bibliografia.



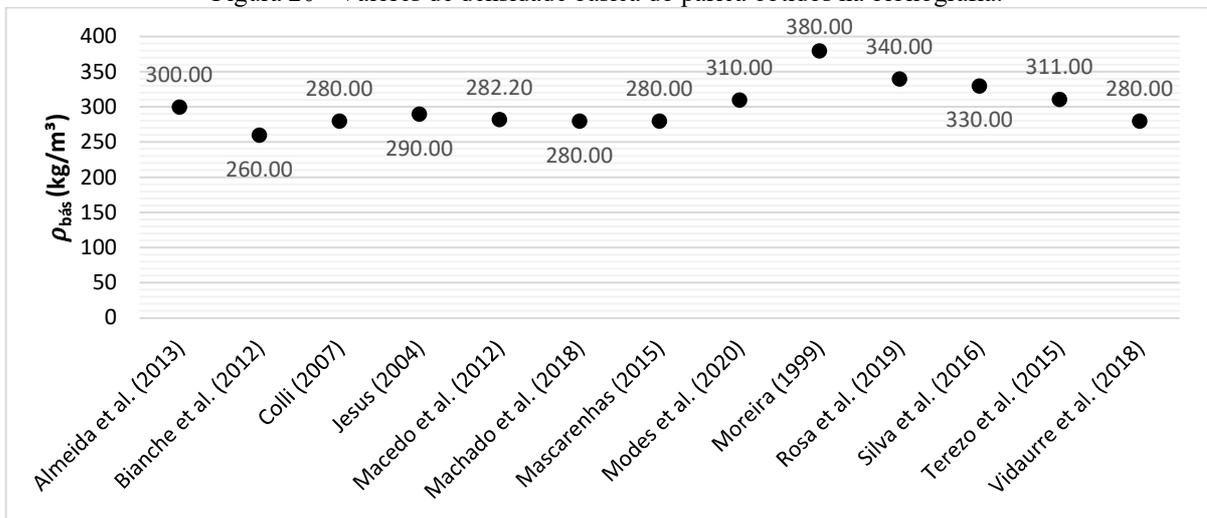
Fonte: Lima et al. (2022).

Dado que as cinco toras foram obtidas em paralelo e no mesmo local de plantio, além disso, o teor de umidade da amostra caracterizar-se como pertencente a classe 1, a densidade aparente se enquadra na classe de madeira de baixa densidade, associado às propriedades organolépticas (textura, dureza, densidade, cor e desenhos da madeira) das cinco toras serem iguais, considerou-se que os resultados apresentados na Tabela 2 são representativos para as cinco toras. Portanto, a tora 5 apresentou o valor mínimo da densidade básica do lote de 220,67 kg.m⁻³, o máximo de 249,69 kg.m⁻³ e uma média de 236,42 kg.m⁻³.

Comparado com outros estudos de caracterização física da madeira de paricá, a Figura 20 mostra valores de densidade básica obtidos na bibliografia analisada. É possível

analisar que a densidade básica média obtida neste estudo ($236,42 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) é inferior em torno de 37,78 % em relação ao trabalho de Moreira (1999) e 9,07 % relativamente ao estudo de Bianche et al. (2012). Os valores médios de densidade básica dos trabalhos constantes na Figura 20 é de $301,78 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, deste modo, a madeira empregada neste estudo estava abaixo da média dos resultados apresentados pelos demais trabalhos. Do mesmo modo que foi mencionado para a densidade aparente, o motivo para o fato de a densidade básica ser inferior aos valores médios dos estudos presentes na Figura 20 está no posicionamento da amostra no tronco, nas condições de crescimento da árvore e na idade no momento do corte.

Figura 20 - Valores de densidade básica do paricá obtidos na bibliografia.



Fonte: Lima et al. (2022).

4.2 Caracterização mecânica

Conforme já exposto, a caracterização mecânica da madeira de paricá consistiu na determinação experimental da resistência e rigidez à compressão paralela à grã. A Tabela 5 apresenta os valores mínimos, máximos, médios, característicos e coeficiente de variação para a resistência à compressão paralela à grã (f_{c0}), para o teor de umidade apresentado em 4.1. É possível verificar que o menor valor obtido foi 12,57 MPa e o maior valor foi 26,63 MPa, para a resistência à compressão paralela à grã.

É possível observar que o menor valor obtido, para a resistência à compressão paralela à grã, foi 12,57 MPa, já o maior valor foi 26,63 MPa. O valor médio das quatro toras foi 20,36 MPa e os valores característicos para a resistência à compressão paralela à grã variaram entre 14,84 MPa e 23,02 MPa. O valor característico para as quatro toras, considerando o teor de umidade de referência de 12%, corrigido através da expressão presente no item 6.2.1 da norma ABNT NBR 7190-3:2022, foi 15,55 MPa.

Tabela 5 - Resultados da resistência à compressão paralela à grã da madeira de paricá.

	Tora 1	Tora 2	Tora 3	Tora 4
	f_{c0} (MPa)	f_{c0} (MPa)	f_{c0} (MPa)	f_{c0} (MPa)
n° CPs	12	12	12	12
Máximo	21,63	26,63	20,14	25,55
Média	18,47	22,11	17,47	23,39
Mínimo	14,70	15,90	12,57	19,17
CV (%)	10,97	14,00	12,62	7,22
Valores característicos	16,07	17,60	14,84	23,02

n° CPs: número de corpos de prova; CV: Coeficiente de variação; f_{c0} : resistência à compressão paralela à grã. Fonte: Lima et al. (2022).

Para constatar a homogeneidade dos resultados de f_{c0} das toras 1, 2, 3 e 4, realizou-se um teste de Tukey com 5% de significância e calculou-se o Coeficiente de variação. Verificou-se que o teste de Tukey (Tabela 6) apenas confirmou a homogeneidade dos resultados entre as toras 1 e 3 e, simultaneamente, entre as toras 2 e 4. Já o coeficiente de variação (Tabela 7), mostrou que todos os resultados estão abaixo do valor de 18%, preconizado pela norma ABNT NBR 7190-3:2022 como sendo a referência abaixo da qual se pode considerar como sendo um lote homogêneo.

Tabela 6 - Tabela este de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a resistência à compressão paralela à grã.

	\bar{f}_{c01}	\bar{f}_{c02}	\bar{f}_{c03}	\bar{f}_{c04}
\bar{f}_{c01}	-	3,634	1,005	4,915
\bar{f}_{c02}	-	-	4,639	1,281
\bar{f}_{c03}	-	-	-	5,920
\bar{f}_{c04}	-	-	-	-

\bar{f}_{c01} , \bar{f}_{c02} , \bar{f}_{c03} e \bar{f}_{c04} são as médias dos resultados das resistências à compressão paralela à grã das toras 1, 2, 3 e 4, respectivamente; resultados inferiores a 2,530 indicam diferenças não significativas para o nível de 5% de probabilidade. Fonte: Lima et al. (2022).

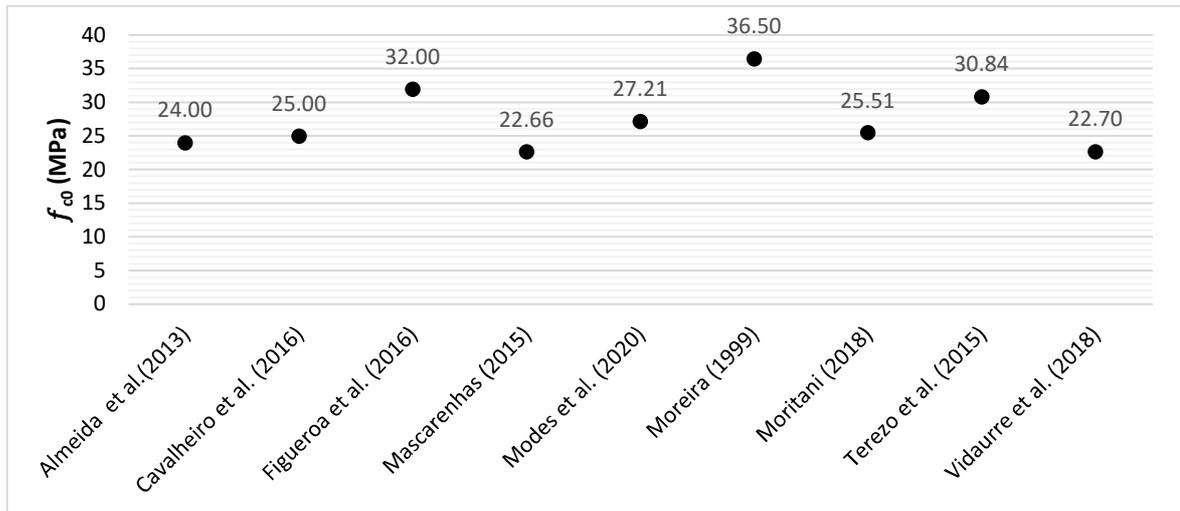
Tabela 7 - Coeficiente de variação entre as resistências à compressão paralela à grã das quatro toras.

	$CV_{f_{c01}}$	$CV_{f_{c02}}$	$CV_{f_{c03}}$	$CV_{f_{c04}}$
$CV_{f_{c01}}$	-	15,58%	11,87%	14,83%
$CV_{f_{c02}}$	-	-	17,88%	11,10%
$CV_{f_{c03}}$	-	-	-	17,53%
$CV_{f_{c04}}$	-	-	-	-

$CV_{f_{c01}}$, $CV_{f_{c02}}$, $CV_{f_{c03}}$ e $CV_{f_{c04}}$ são os coeficientes de variação referentes às resistências à compressão paralela à grã das toras 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Fonte: Lima et al. (2022).

A Figura 21 apresenta a comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os demais estudos que envolveram o estudo da resistência à compressão paralela à grã da madeira de paricá. Todos os valores médios encontrados na literatura foram superiores ao valor médio apresentado neste trabalho. A resistência média à compressão paralela à grã constatada neste trabalho para as quatro toras (20,36 MPa) é 25,64% menor que a média geral de todos os valores encontrados na literatura.

Figura 21 - Valores da literatura para o valor médio da resistência à compressão paralela à grã.



Fonte: Lima et al. (2022).

Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade à compressão paralela à grã, obtidos a partir dos CPs provenientes da tora 5, estão presentes na Tabela 8. O valor médio para o módulo de elasticidade à compressão paralela à grã é de 7358,90 MPa. É importante salientar que os valores obtidos para a tora 5, foram encontrados em um contexto de teor de umidade médio igual a 12,28%.

Tabela 8 – Propriedade de rigidez da Tora 5.

	E_{c0} (MPa)
n° CPs	6
Máximo	9694,63
Média	7358,90
Mínimo	5650,61
CV (%)	19,69
Valores característicos	-

E_{c0}: módulo de elasticidade à compressão paralela à grã. Fonte: Lima et al. (2022).

O valor médio do módulo de elasticidade à compressão paralela à grã, constatado neste estudo (7358,90 MPa) é cerca de 0,53% superior ao valor encontrado por Almeida et al. (2013) que, trabalhando com a madeira de paricá com 10 anos de idade, constatou um valor médio de 7320 MPa para essa propriedade mecânica.

O lote de madeira analisado possuía 5 anos de idade e apresentou teor de umidade médio de 11,33%, estando enquadrado na classe de umidade 1, conforme a Tabela 1 da norma ABNT NBR 7190-1:2022. Quanto às densidades aparente e básica, foram obtidos valores médios de 275,57 kg.m⁻³ e 236,42 kg.m⁻³, respectivamente, caracterizando esta madeira como sendo de baixa densidade. O valor médio de resistência à compressão paralela à grã foi de 20,36

MPa, enquanto o valor característico foi de 15,55 MPa, sendo que o valor do Coeficiente de Variação foi inferior a 18%, caracterizando o lote como sendo homogêneo. O valor médio do módulo de elasticidade à compressão paralela à grã foi de 7358,90 MPa.

4.3 Ensaio de compressão de peças esbeltas para a determinação dos coeficientes de flambagem k

O ensaio de compressão de peças esbeltas de madeira de paricá consistiu na determinação experimental dos coeficientes de flambagem k para as condições de apoio EE (engaste-engaste), EA (engaste-apoio) e AA (apoio-apoio), através da expressão da carga crítica de Euler (Equação 3), na qual a P_{cr} foi substituída pela força máxima. Por conseguinte, a Tabela 9 mostra os valores mínimos, máximos, médios e coeficiente de variação para o coeficiente k nas condições de vinculação acima citadas.

Para a condição de apoio EE, a amostra de resultados apresentou o valor mínimo para k de 0,48, média igual a 0,70, máximo de 0,97 e coeficiente de variação de 17,34%. Para a condição de vinculação externa EA, os resultados apresentaram o valor mínimo para k de 0,57, valor médio de 0,68, máximo de 0,79 e coeficiente de variação de 7,94%. Já em relação a condição de apoio AA, a amostra apresentou resultados de k de 0,75 para o valor mínimo, 0,96 para a média, 1,19 para valor máximo e coeficiente de variação de 11,26%.

Em termos de valores médios e máximos, a condição EA apresentou os menores valores (0,68 para a média e 0,79 para o máximo), sendo que o maior valor foi obtido para a condição AA (0,96 para a média e 1,19 para o máximo). Para os valores mínimos, a condição EE foi aquela que obteve menores resultados (0,48), sendo que a condição AA obteve o maior valor mínimo (0,75). Em termos de coeficiente de variação, a condição EE apresentou uma maior variabilidade, enquanto a condição EA obteve uma amostra com menor variação.

Tabela 9 – Coeficientes de flambagem (k) para os três tipos de apoio.

	EE	EA	AA
n° CPs	30	30	30
Máximo	0,97	0,79	1,19
Média	0,70	0,68	0,96
Mínimo	0,48	0,57	0,75
CV (%)	17,34	7,94	11,26

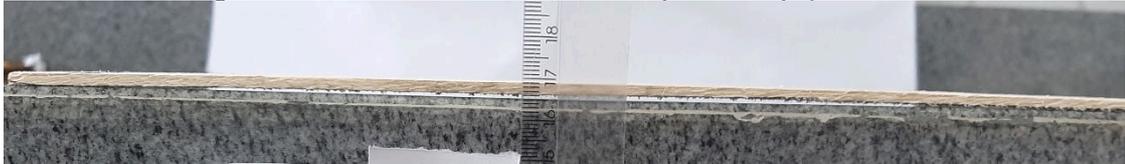
Fonte: A autora.

Os CPs analisados no ensaio de compressão de peças esbeltas, apresentaram defeitos como: bio-deterioração no comprimento dos CPs, curvatura inicial (Figura 22), a



aplicação da carga não estava perfeitamente centralizada no centro geométrico dos CPs, os mesmos apresentaram imperfeições geométricas com seções transversais variadas, além de não serem perfeitamente retilíneos, além disso, os apoios utilizados podem ter adicionado tensões no decorrer do ensaio. Todos esses fatores ajudam a explicar a variabilidade apresentada nos resultados.

Figura 22 – Curvatura inicial no CP de compressão de peças esbeltas.



Fonte: A autora.

Apesar disso, em todas as condições de vinculação externa, o coeficiente de variação ficou inferior a 18%, sendo este o valor admissível para esforços normais segundo a norma ABNT NBR 7190-3:2022. Dessa forma, o lote analisado é considerado um lote homogêneo, existindo representatividade nos resultados obtidos.

Tabela 10 – Valores teóricos, normativos e experimentais de coeficientes de flambagem k para as condições de apoio (EE, EA e AA).

Teórico	0,5	0,7	1,0
NBR 7190:2022	0,65	0,8	1,0
NBR 7190:1997	-	-	1,0
Experimental	0,7	0,68	0,96

Fonte: A autora.

Conforme a Tabela 10, para a condição de vinculação externa EE, em relação ao valor médio e máximo, o valor encontrado foi de 0,7 e 0,97, respectivamente, enquanto que o valor teórico para a mesma condição de apoio é de 0,50. A condição de apoio EA, em termos de valores médios e máximos, apresentou 0,68 para a média, 0,79 para valor máximo e a teoria apresenta o valor de 0,7. Já a condição AA, obteve 0,96 para valor médio e 1,19 para valor máximo, enquanto que o valor teórico é de 1,0.

Em relação a norma ABNT NBR 7190:1997, a mesma só apresenta valor de k para a condição de vinculação externa AA, só sendo possível fazer a comparação com a condição AA experimental, onde este é 0,96 para valor médio e 1,19 para valor máximo, já a norma apresenta o valor 1,0.

Em termos de valores médios e máximos, a condição EE obteve o valor de 0,7 e 0,97 para média e máximo, respectivamente, enquanto que o valor médio apresentado pela norma ABNT NBR 7190-1:2022 é 0,65. A condição de apoio EA apresenta para valor médio, 0,68 e valor máximo, 0,79, já o valor normativo médio é 0,8. Para a condição AA, foi encontrado o valor médio de 0,96 e 1,19 para valor máximo, enquanto que o valor normativo é de 1,0.

É possível verificar que, em todos os casos de vinculação, os valores experimentais máximos foram superiores aos valores de k teóricos. Comparando os resultados obtidos experimentalmente com os valores de k presentes na norma ABNT NBR 7190-1:2022, é possível verificar que, apenas na condição EA, o valor máximo de k obtido neste trabalho não é superior. Na condição EE, tanto a média, quanto o valor máximo experimental de k , foram superiores aos valores teórico e normativo.

Em relação à teoria, todos os valores máximos experimentais são superiores, sendo necessário o uso de valores recomendados para manter uma margem de segurança mínima no dimensionamento estrutural, sobretudo na condição EE, uma vez que os valores experimentais e teóricos apresentam elevada discrepância, permitindo que a estrutura sujeita ao colapso antes do esperado ao utilizar os valores teóricos.

É reconhecível que a norma ABNT NBR 7190-1:2022 apresenta avanço significativo em relação norma ABNT NBR 7190:1997, já que esta contempla valores de k para as três vinculações de interesse desse estudo (EE, EA e AA) e apresenta outras situações de vinculação, permitindo dessa forma, o cálculo de estruturas comprimidas mais econômicas e seguras.

No entanto, os valores de k para EE, EA e AA apresentados pela ABNT NBR 7190-1:2022 são iguais aos valores recomendados pela norma ABNT NBR 8800:2008, sendo que a madeira é um material que possui características físicas, mecânicas e comportamento quando submetida a determinados esforços diferente do material aço, não existindo dessa forma, nenhuma validação em termos de campanha experimental que sustente esses valores e portanto precisa-se de estudos que comprovem tais k , utilizando o próprio material madeira.

A segurança dos valores apresentados pela norma não está garantida por conta dos valores máximos experimentais serem maiores do que os coeficientes k da ABNT NBR 7190-



1:2022, exceto a condição de apoio EA, que apresenta valor experimental menor, mas sobretudo para EE, no qual tanto valor médio quanto máximo são superiores. Isso é preocupante, visto que, na Equação 3, o valor de k está elevado ao quadrado e, quanto maior for a diferença entre k 's, maior será a defasagem entre a carga crítica real (experimental) e a cargas críticas teórica e normativa.

Dessa forma, são necessárias mais campanhas de ensaios com outras espécies de madeira, assim como, com outras vinculações para se propor valores normativos mais adequados de k na próxima revisão da norma de madeira.



5 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou os coeficientes de flambagem de peças esbeltas de madeira de paricá (*Schizolobium Amazonicum*) comprimidas e com três situações de vinculação externas, sendo estas usuais em estruturas de madeira convencionais. A caracterização física da madeira de paricá utilizada, revelou que esta apresentava teor de umidade médio das cinco toras de 11,33%, densidade aparente de 275,57 kg.m⁻³ e básica de 236,42 kg.m⁻³. O ensaio de compressão paralela à grã revelou um valor médio de resistência igual a 26,63 MPa e módulo de elasticidade à compressão paralela à grã de 7358,90 Mpa.

Com os valores provenientes da caracterização mecânica quanto à compressão paralela às fibras e as dimensões da máquina universal de ensaios INSTRON EMIC 23-100, obtiveram-se as dimensões de (2,0 x 0,3 x 31,0) cm³ para os CPs do ensaio de compressão de peças esbeltas. O valor experimental médio de k obtido para a condição de apoio EE foi de 0,7, para EA de 0,68 e a condição AA obteve 0,96.

Os valores experimentais obtidos máximos foram superiores aos valores teóricos e normativos, com a exceção da condição EA. Isto revela a necessidade de mais ensaios com outras espécies de madeira e outras vinculações para se propor valores normativos mais adequados de coeficientes de flambagem k .



REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. H. D.; SCALIANTE, R. D. M.; MACEDO, L. B. D.; MACÊDO, A. N.; DIAS, A. A.; CHRISTOFORO, A. L.; CALIL JUNIOR, C. Caracterização completa da madeira da espécie amazônica Paricá (*Schizolobium amazonicum* HERB) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, v. 37, n. 6, p. 1175-1181, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

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

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

BEDFORD, Anthony; LIECHTI, Kenneth M. **Mechanics of Materials**. 2. ed. Switzerland: Springer Nature, 2020.

BEER, Ferdinand P; JOHNSTON JR, Russell E; DEWOLF, John T; MAZUREK, David F. **Mecânica dos materiais**. 7. ed. Porto Alegre: Amgh, 2015.

BIANCHE, J. J.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; PEREIRA, F. A.; SANTOS, R. C. D.; SORATTO, D. N. Propriedades de painéis aglomerados fabricados com partículas de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*), paricá (*Schizolobium amazonicum*) e vassoura (*Sida* spp.). **Cerne**, v. 18, p. 623-630, 2012.

BISSOLI-DALVI, M.; FERRES, S. C.; ALVAREZ, C. E. D.; & FUICA, G. E. S. Avaliação da sustentabilidade da madeira por meio da ferramenta ISMAS. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 7, 2017.

Climatologia e histórico de previsão do tempo em Açailândia, BR. **Climatempo** (2022). Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/climatologia/1034/acailandia-ma>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

CAVALHEIRO, Raquel Schmitt. **Madeira Laminada Colada de *Schizolobium amazonicum* Herb. (Paricá): combinação adesivo/tratamento preservante**. 2014. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2014.

COLLI, Andréia. **Caracterização da madeira de Paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) e propriedades de chapas de partículas aglomeradas com diferentes**



proporções de fibras de coco (Cocos nucifera L.). 2007. 64f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

CORDEIRO, I. M. C. C.; BARROS, P. L. C. D.; LAMEIRA, O. A.; GAZEL FILHO, A. B. Avaliação de plantios de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby de diferentes idades e sistemas de cultivo no município de Aurora do Pará-PA (Brasil). **Ciência Florestal**, v. 25, p. 679-687, 2015.

COSTA, L. J.; LOPES, C. B. S.; REIS, M. F. C.; CÂNDIDO, W. L.; DE FARIA, B. F. H.; DE PAULA, M. O. Caracterização anatômica e descrição físico-química e mecânica da madeira de *Mimosa schomburgkii*. **FLORESTA**, v. 47, n. 4, p. 383 -390, out/dez. 2017.

CALIL, Carlito; LAHR, Francisco Antônio Rocco; MARTINS, Gisele Cristina Antunes; DIAS, Antonio. **Estruturas de madeira: projetos, dimensionamento e exemplos de cálculo.** 1, ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

DIAS, João Miguel Santos. **Estrutura de Madeira.** Salvador: 2B, 2018.

DIAS, A. A. et al. **Estruturas de madeira: projetos, dimensionamento e exemplos de cálculo.** 1^a, ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

DIAS, João Miguel Santos. **Ligações estruturais com barras de aço coladas com epóxi em madeiras de alta densidade: influência dos defeitos da madeira e dos erros de produção na resistência mecânica.** 2015. 218p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

EHRHART, T.; STEIGER, R.; PALMA, P.; GEHRI, E.; FRANGI, A. Glulam columns made of European beech timber: compressive strength and stiffness parallel to the grain, buckling resistance and adaptation of the effective-length method according to Eurocode 5. **Materials and Structures**, v. 53, n. 4, p.1-12, 2020.

FIGUEROA, Manuel Jesús Manríquez. **Influência da temperatura sobre a resistência mecânica do paricá.** 2008. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Fator de redução de temperatura para resistência à compressão paralela ao grão. **Fire Safety Journal**, v. 83, p. 99-104, 2016.

GAMA, D. C.; JESUS, J. B.; BONFIM, J. S.; MENEZES, M. S.; DEUS, D. A. Madeiras serradas empregadas na construção civil habitacional do município de Ribeira do Pombal - BA. **Agroforestalis News**, v. 1, n. 2, p. 15-23, 2016.

GERE, James M.; GOODNO, Barry J. **Mecânica dos Materiais.** 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais.** 10. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2019.** São Paulo: IBÁ, 2019.



IWAKIRI, S.; ZELLER, F.; PINTO, J. A.; RAMIREZ, M. G. L.; SOUZA, M. M.; SEIXAS, R. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* "Paricá" e *Cecropia hololeuca* "Embaúba" para produção de painéis aglomerados. **Acta amazonica**, v. 40, n. 2, p. 303-308, 2010.

JESUS, Regina Célia Silva. **Características anatômicas e físicas da madeira de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. ducke), plantado em diferentes espaçamentos e condições ambientais no município de aurora do Pará-PA.** 2004. 176p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2004.

LEPAGE, E.; SALIS, A. G.; GUEDES, E. C. R. **Tecnologia de proteção da madeira.** 1. ed. São Paulo: Montana Química S. A, 2017.

LIMA, V. S.; NASCIMENTO, S. L., SANTOS; M. C., DIAS, J. M. S.; NASCIMENTO, B. L. M. Avaliação geográfica e econômica das indústrias de compensado no Brasil. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 8, n. 4, p. 14162-01e, 2022a.

LIMA, V. S.; NASCIMENTO, S.L.; SANTOS, M.C.; NASCIMENTO, B. L. M.; CÉSAR, S. F; DIAS, J. M. S. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de paricá (*Schizolobium amazonicum*) utilizada na indústria de compensados no Estado do Maranhão. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n.9, p. e46911932065-e46911932065, 2022b.

MACEDO, Laurenn Borges; ALMEIDA, Diego Henrique; SCALIANTE, Ricardo de Mello; VARANDA, Luciano Donizeti. Caracterização de algumas propriedades físicas da madeira de Paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb). **CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, METALÚRGICA E INDUSTRIAL – CONEMI**, (Vol. 12), São João del-Rei, Minas Gerais, 2012.

MACHADO, J. F., HILLIG, É., WATZLAWICK, L. F., BEDNARCZUK, E., & TAVARES, E. L. Production of plywood panel for exterior use with paricá and embaúba timbers. **Revista Árvore**, v. 42, n. 4, 2018.

MASCARENHAS, Adriano Reis Prazeres. **Indicadores de qualidade ambiental e caracterização tecnológica da madeira em sistema agroflorestal multiestratificado.** 2015. 82 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Rondônia, Rolim de Moura, 2015.

MELCONIAN, Sarkis. **Mecânica técnica e resistência dos materiais.** 20. ed. São Paulo: Érica, 2012.

MELO, R. R.; MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, M. R.; STANGERLIN, D. M. Avaliação das propriedades físicas, químicas, mecânicas e de superfície de lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 2, p. 238-249, 2013.

MELO, R. R.; MENEZZI, C. H. S. Estimativas das propriedades de compostos LVL produzidos com paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) por meio de stress wave. **Revista Árvore**, v. 38, n. 6, p. 1155-1163, 2014.



MODES, K. S.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; VIVIAN, M. A.; SANTOS, L. M. H. Propriedades físico-mecânicas da madeira sólida de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v. 7, n. 2, p. 989-995, 2020.

MOREIRA, Walmir da Silva. (1999). **Relações entre propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas da madeira**. 1999. 119p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

MORITANI, Fabiana Yukiko. **Proposta de classes de resistência para peças estruturais de madeira: *Eucalyptus urograndis*, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (Paricá)**. 2018. 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

NASCIMENTO, S. L.; LIMA, V. S.; SANTOS, M. C.; DIAS, J. M. S.; CÉSAR, S. F. Perfil das empresas madeireiras no município de Salvador. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 8, n. 4, p. 14163-01e, 2022.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PEREIRA, K. D.; VIANA, R. G.; TRINDADE, J. R.; CARDOSO, R. A. Morphological and Physiological Changes on *Schizolobium Parahyba* Var. *Amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby Plants Intoxicated by Glyphosate. **CERNE**, v. 23, n. 2, p. 267-274, 2017.

ROCHA, Jadir de Souza. **A segurança de estruturas de madeira determinada a partir da variabilidade da densidade básica e de propriedades mecânicas de madeiras amazônicas**. 1994. 166p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

ROSA, T. O.; TEREZO, R. F.; MASCIA, N. T.; RIGHEZ, J. L. B. Glued laminated timber of paricá reinforced with synthetic fibers. **Floresta**, v. 49, n. 3, p. 459-468, 2019.

SANTOS, Caio Victor Fernandes. Caracterização físico-mecânica de elementos Estruturais roliços perfilados de Amaru. Itapeva, SP. 2013. 68f.

SILVA, M.G.; MORI, F.A.; FERREIRA, G.C.; RIBEIRO, A.O.; CARVALHO, A.G.; BARBOSA, A. C. M. C. Estudo anatômico e físico da madeira de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* proveniente de povoamentos nativos da Amazônia Oriental Estudos anatômicos e físicos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* de povoamentos nativos da Amazônia oriental. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 293-301, jun. 2016.

SILVA, C. J. D.; VALE, A. T. D.; MIGUEL, E. P. Densidade básica da madeira de espécies arbóreas de Cerradão no estado do Tocantins. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 63-75, 2015.

SILVA, J. G. M.; MEDEIROS NETO, P. N.; SORANSO, R. R.; TINTI, V. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; OLIVEIRA, J. G. L. Influence of anatomy on the adhesion performance of four wood species. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 4, 2020.



SILVA, V. P. S., MATOS, D. F., LIMA, T. J., MOREIRA, W.M. & DIAS, J.M.S. Análise do teor de umidade de madeiras comercializadas na cidade de Açailândia – MA. **III Semana de Engenharia Civil – SEC**, Marabá-PA, 2019.

SILVEIRA, R.; SILVA, G. F.; BINOTI, D. H. B.; DA PASCHOA MANHÃES, L.; GONÇALVES, A. F. A.; AQUINO, A. M. Custos da produção de madeira de paricá na região de Paragominas, PA. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 92, p. 597-604, 2017.

TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A.; VALLE, A.; SAMPAIO, C. A. P.; STÜPP, A. M. Propriedades da madeira de paricá em diferentes idades para uso estrutural. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 3, p. 244-253, 2015.

Trianoski, R.; Matos, J. L. M.; Iwakiri, S.; Prata, J. G. Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de pinheiros tropicais. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, pág. 21-28, 2014.

VIDAURRE, G. B.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, R. C. D.; VALLE, M. L. A. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Revista Árvore**, v. 36, n. 2, p. 365-371, 2012.

VIDAURRE, G. B.; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A. C.; OLIVEIRA J. T. S.; MOULIN, J. C.; SILVA, J. G. M.; SORANSO, D. R. Physical and mechanical properties of juvenile *Schizolobium amazonicum* wood. **Revista Árvore**, v. 42, n. 1, p. 1-9, 2018.

ZENID, G. J. et al. **Qualidade da madeira**. REMADE: Revista da Madeira, out. 2012.



APÊNDICES



APÊNDICE A - SOLUÇÃO GERAL PARA A EQUAÇÃO DIFERENCIAL LINEAR HOMOGÊNEA DE SEGUNDA ORDEM EM UMA BARRA BI-APOIADA

Para uma equação diferencial linear homogênea de segunda ordem com coeficientes constantes,

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \lambda^2 y = 0 \quad (23)$$

Sua solução geral é:

$$y = B \sin \lambda x + C \cos \lambda x \quad (24)$$

As duas constantes de integração B e C são determinadas pelas condições de contorno nas extremidades da coluna. Visto que, em:

$$x = 0, y = 0, \text{ obtém-se: } C = 0$$

E para: $x = L, y = 0$, obtém-se:

$$B \sin \lambda L = 0 \quad (25)$$

Essa equação é satisfeita se $B = 0$, ou se $\sin \lambda L = 0$. Se a primeira dessas condições for atendida, a (24) se reduz a $y = 0$ e a coluna estará reta. Para que a segunda condição seja satisfeita, é necessário ter $\lambda L = n\pi$, onde $n = 1, 2, 3 \dots$, ou substituindo $\lambda^2 = \frac{P}{EI}$ e resolvendo para P :

$$P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad (26)$$

Onde, quando $n = 1$, obtém-se o menor P_{cr} possível, $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$.



APÊNDICE B - SOLUÇÃO GERAL PARA A EQUAÇÃO DIFERENCIAL LINEAR NÃO HOMOGÊNEA DE SEGUNDA ORDEM EM UMA BARRA BI –ENGASTADA

Dada a equação:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \lambda^2 y = \frac{V_0}{EI} + \frac{M_0}{EI} \quad (27)$$

A solução homogênea da (27) é:

$$y_h = B \sin \lambda x + C \cos \lambda x \quad (28)$$

Onde B e C são constantes. O termo não homogêneo da mesma equação é um polinômio em x , dessa forma é necessária uma solução particular na forma de um polinômio da mesma ordem: $y_p = a_0 + a_1 x$.

Substituindo esta expressão na (27) e escrevendo a equação resultante como:

$$\left(\lambda^2 a_0 - \frac{M_0}{EI} \right) + \left(\lambda^2 a_1 - \frac{V_0}{EI} \right) x = 0 \quad (29)$$

$$\text{Encontra-se: } a_0 = \frac{M_0}{\lambda^2 EI} \text{ e } a_1 = \frac{V_0}{\lambda^2 EI}$$

Produzindo a solução particular:

$$y_p = \frac{M_0}{\lambda^2 EI} + \frac{V_0}{\lambda^2 EI} x \quad (30)$$

A solução geral de (27) é, portanto:

$$y = y_h + y_p = B \sin \lambda x + C \cos \lambda x + \frac{M_0}{\lambda^2 EI} + \frac{V_0}{\lambda^2 EI} x, \quad (31)$$

E a inclinação é:

$$y' = \lambda B \cos \lambda x - \lambda C \sin \lambda x + \frac{V_0}{\lambda^2 EI} \quad (32)$$

As condições de contorno em $x = 0$:

$$y /_{x=0} = C + \frac{M_0}{\lambda^2 EI} = 0 \quad (33)$$

$$y' /_{x=0} = \lambda B + \frac{V_0}{\lambda^2 EI} = 0 \quad (34)$$

Resolvendo essas equações para M_0 e V_0 e substituindo os resultados nas Equações (31) e (32), é obtido:

$$y = (\sin \lambda x - \lambda x)B + (\cos \lambda x - 1)C, \quad (35)$$

$$y' = (\lambda \cos \lambda x - \lambda)B - \lambda C \sin \lambda x, \quad (36)$$

Para a condições de contorno em $x = L$:

$$y /_{x=L} = (\sin \lambda L - \lambda L)B + (\cos \lambda L - 1)C = 0, \quad (37)$$



$$y' /_{x=L} = (\lambda \cos \lambda L - \lambda)B - \lambda C \sin \lambda L = 0 \quad (38)$$

Resolvendo a primeira dessas equações para B :

$$B = \frac{1 - \cos \lambda L}{\sin \lambda L - \lambda L} C \quad (39)$$

E substituindo este resultado na Equação (38), produz a equação característica:

$$\lambda L \sin \lambda L + 2 \cos \lambda L - 2 = 0 \quad (40)$$

Também substituindo a Eq. (39) na Eq. (35), obtendo a distribuição da deflexão na forma:

$$y = C \left[\frac{1 - \cos \lambda L}{\sin \lambda L - \lambda L} (\sin \lambda x - \lambda x) + \cos \lambda x - 1 \right] \quad (41)$$

As três primeiras raízes determinadas numericamente, da função característica da Equação (39), $f(\lambda L) = \lambda L \sin \lambda L + 2 \cos \lambda L - 2$, são $\lambda L = 2\pi, 8.987$ e 12.566 . As formas dos três primeiros modos de flambagem obtidas da Equação (41) e as cargas de flambagem associadas são:

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}, \frac{80,76 EI}{L^2} \text{ e } \frac{157,9 EI}{L^2}$$

E portanto, a menor carga crítica obtida é para quando $\lambda L = 2\pi$: $P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}$.



**APÊNDICE C - SOLUÇÃO GERAL PARA A EQUAÇÃO DIFERENCIAL LINEAR
NÃO HOMOGÊNEA DE SEGUNDA ORDEM EM UMA BARRA ENGASTADA-
APOIADA**

Para a equação diferencial linear não homogênea de segunda ordem, com coeficientes constantes:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \lambda^2 y = -\frac{Vx}{EI} \quad (42)$$

Observa-se que os membros esquerdos das Equações (23) e (42) são idênticos, dessa forma conclui-se que a solução geral de (42) pode ser obtida adicionando uma solução particular a solução homogênea de (23). Onde essa solução particular é:

$$y = -\frac{Vx}{\lambda^2 EI}$$

Ou usando a notação, $\lambda^2 = \frac{P}{EI}$:

$$y = -\frac{Vx}{P} \quad (43)$$

A solução geral da Equação 42 é o somatório das Equações (24) e (43):

$$y = B \sin \lambda x + C \cos \lambda x - \frac{Vx}{P} \quad (44)$$

As constantes A e B e o valor da força transversal desconhecida V são obtidos com base nas condições de contorno indicadas na Figura 8. Fazendo primeiro $x = 0$, $y = 0$ na Equação 44, conclui-se que $B = 0$. Fazendo, $x = L$, $y = 0$, é encontrado:

$$B \sin \lambda x = \frac{V}{P} L \quad (45)$$

Calculando:

$$\frac{dy}{dx} = B \cdot \lambda \cdot \cos(\lambda x) - \frac{V}{P}$$

E fazendo $x = L$, $\frac{dy}{dx} = 0$, tem-se:

$$B \cdot \lambda \cdot \cos(\lambda L) = \frac{V}{P} \quad (46)$$

Dividindo (45) por (46), membro a membro, conclui-se que uma solução de (44) pode existir somente se:

$$tg(\lambda L) = \lambda L \quad (47)$$

Resolvendo essa equação por tentativa e erro, conclui-se que o menor valor de λL que satisfaz (47) é:

$$\lambda L = 4,4934 \quad (48)$$



Usando a notação $\lambda^2 = \frac{P}{EI}$, o valor de λ definido pela Equação 48 e resolvendo para P , obtém-se o valor da força crítica: $P_{cr} = \frac{20,19EI}{L^2}$.



APÊNDICE D - SOLUÇÃO GERAL PARA A EQUAÇÃO DIFERENCIAL LINEAR NÃO HOMOGÊNEA DE SEGUNDA ORDEM QUE DETERMINA A FÓRMULA DA SECANTE

Para encontrar a solução geral da Equação (10), observa-se que os membros esquerdos dessa equação e de (23) são idênticos, dessa forma conclui-se que a solução geral da Equação (10) pode ser obtida adicionando uma solução particular a solução homogênea da (23). A solução geral consta na Equação (49), onde o último termo é a solução particular.

$$y = B \sin \lambda x + C \cos \lambda x - e \quad (49)$$

As constantes A e B são obtidos com base nas condições de contorno indicadas na Figura 9. Fazendo primeiro $x = 0$, $y = 0$ em $M = -P.y - P.e$, conclui-se que $C = e$. Fazendo, $x = L$, $y = 0$, é encontrado:

$$B \sin \lambda L = e(1 - \cos \lambda L) \quad (50)$$

$$\text{Sabendo que: } \sin \lambda L = 2 \operatorname{sen} \frac{\lambda L}{2} \cos \frac{\lambda L}{2} \text{ e } 1 - \cos \lambda L = 2 \operatorname{sen}^2 \frac{\lambda L}{2}$$

$$\text{E substituindo (50), obtém-se: } B = e \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\lambda L}{2} \right).$$

Fazendo a substituição de B e C na Equação 49, é obtida a equação da linha elástica:

$$y = e \left(\operatorname{tg} \frac{\lambda L}{2} \operatorname{sen} \lambda x + \cos \lambda x - 1 \right) \quad (51)$$

A deflexão máxima é obtida fazendo $x = \frac{L}{2}$ em (51), reorganizando a fórmula, obtém-se: $y = e \left(\sec \frac{\lambda L}{2} - 1 \right)$ e fazendo $\lambda^2 = \frac{P}{EI}$, é encontrada a equação:

$$y_{\max} = e \left(\sec \left(\frac{L}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}} \right) - 1 \right)$$



APÊNDICE E – COMPRIMENTO DOS CPS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DE PEÇAS ESBELTAS

A carga mínima aplicada foi encontrada através da resistência mínima obtida nos ensaios de compressão paralela à grã:

$$f_{c0,min} = \frac{F}{A}$$

Substituindo a $f_{c0,min}$ pela menor resistência obtida nos ensaios à compressão paralela à grã e a área dos mesmos CPs sendo de $(50 \times 50) \text{ mm}^2$, obtém-se a força mínima.

$$12,57 = \frac{F}{2500} \leftrightarrow F = 314222,91N$$

Sabendo que a área da seção transversal dos CPs utilizados no ensaio de compressão de peças esbeltas é de $(20 \times 3) \text{ mm}^2$, a força mínima é definida como:

$$12,57 = \frac{F}{20 \times 3} \leftrightarrow F = 754,2 N$$

Com a determinação da força mínima e o módulo de elasticidade mínimo encontrado sendo 5650,61, é possível encontrar o comprimento mínimo possível para o ensaio de compressão de peças esbeltas:

$$754,2 = \frac{\pi^2 \times 5650,61 \times \left(\frac{20 \times 3^3}{12}\right)}{L^2} \leftrightarrow L = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 5650,61 \times \left(\frac{20 \times 3^3}{12}\right)}{(754,2 \times 0,5)^2}} \leftrightarrow L = 116 \text{ mm}$$

Somando o comprimento livre de 116 mm e o comprimento das garras de 121 mm, obtém-se o comprimento mínimo total de 237 mm.



APÊNDICE F - TAXA DE APLICAÇÃO DE CARGA PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO DE PEÇAS ESBELTAS

A taxa de carregamento aplicada no ensaio de compressão de peças esbeltas foi a mesma prevista na norma ABNT NBR 7190-3:2022 para o ensaio de resistência à compressão paralela à grã, com velocidade de ensaio de 10 MPa/min. Sabendo que a área da seção transversal dos CPs utilizados no ensaio de compressão de peças esbeltas é de $(20 \times 3) \text{ mm}^2$, a velocidade de ensaio é definida como:

$$\sigma = \frac{F}{A} \leftrightarrow 10 = \frac{F}{20 \times 3} \leftrightarrow F = 600 \text{ N/min}$$



APÊNDICE G - TABELAS

Tabela G.1 - valores de teor de umidade e densidade aparente.

CP	Tora 1		Tora 2		Tora 3		Tora 4	
	U (%)	ρ (kg/m ³)						
1	10.27	265.45	10.43	261.22	10.56	238.63	9.89	335.96
2	10.63	254.71	10.66	258.52	10.87	287.69	9.99	324.69
3	10.09	251.40	10.38	246.82	10.66	295.22	10.10	342.08
4	10.24	268.37	10.84	253.92	10.63	244.42	10.17	334.67
5	9.85	251.76	11.01	258.36	10.73	287.04	10.55	336.52
6	9.59	247.40	10.72	233.78	10.52	241.64	10.29	327.37
7	9.61	241.61	10.87	266.98	10.50	236.49	10.26	334.01
8	10.40	242.13	11.26	266.81	10.51	275.04	10.45	329.80
9	10.38	239.61	10.54	242.22	10.26	276.62	10.39	335.18
10	9.98	239.38	10.60	252.13	10.05	231.28	10.36	337.82
11	10.38	235.37	10.67	264.25	9.74	275.14	10.56	340.63
12	10.05	229.62	10.61	297.13	9.62	253.18	10.53	337.05

Fonte: A autora

Tabela G.2 - Valores densidade básica.

CP	$\rho_{bás}$ (kg/m ³)
1	223,53
2	237,76
3	249,69
4	235,25
5	230,05
6	242,14
7	248,12
8	241,87
9	248,62
10	220,67
11	233,50
12	225,79

Fonte: A autora



Tabela G.3 - Dados de resistência a compressão paralela à grã (MPa).

CP	Tora 1	Tora 2	Tora 3	Tora 4
1	21.63	22.53	18.49	23.12
2	18.98	15.90	12.57	22.60
3	20.90	18.94	15.92	24.42
4	17.15	20.16	17.30	22.87
5	20.01	20.53	18.89	24.22
6	17.11	26.63	19.80	23.22
7	18.53	26.21	15.80	19.17
8	17.76	24.38	16.47	22.58
9	16.13	24.25	20.14	24.80
10	20.16	22.40	18.22	25.21
11	18.64	20.48	16.21	25.55
12	14.70	22.89	19.81	22.90

Fonte: A autora

Tabela G.4 - Dados de módulo de elasticidade à compressão paralela à grã (MPa).

CP	E_{c0} (MPa)
CP 01	9694,63
CP 02	6947,59
CP 03	8325,92
CP 04	6370,10
CP 05	5650,61
CP 06	7164,58

Fonte: A autora



Tabela G.5 - Resultados dos coeficientes k para as condições de apoio (EE, EA E AA).

EE 1	0.531343	EA 1	0.78751	AA 1	0.990697
EE 2	0.616204	EA 2	0.630435	AA 2	0.747858
EE 3	0.601087	EA 3	0.663213	AA 3	1.294389
EE 4	0.644862	EA 4	0.616753	AA 4	1.029173
EE 5	0.615022	EA 5	0.561313	AA 5	0.943789
EE 6	0.479275	EA 6	0.702489	AA 6	1.000322
EE 7	0.647383	EA 7	0.656094	AA 7	1.137794
EE 8	0.571084	EA 8	0.651248	AA 8	0.96871
EE 9	0.637006	EA 9	0.717913	AA 9	1.082212
EE 10	0.790658	EA 10	0.645794	AA 10	0.956534
EE 11	0.54381	EA 11	0.710235	AA 11	0.94559
EE 12	0.635153	EA 12	0.752422	AA 12	1.006292
EE 13	0.667051	EA 13	0.83314	AA 13	1.271546
EE 14	0.455227	EA 14	0.674161	AA 14	1.126067
EE 15	0.702595	EA 15	0.632024	AA 15	0.726384
EE 16	0.969137	EA 16	0.641927	AA 16	0.943994
EE 17	0.695171	EA 17	0.708324	AA 17	0.850443
EE 18	0.786231	EA 18	0.790816	AA 18	1.192838
EE 19	0.800283	EA 19	0.573567	AA 19	0.780242
EE 20	0.895724	EA 20	0.663357	AA 20	1.028183
EE 21	0.787235	EA 21	0.711123	AA 21	1.022989
EE 22	0.812164	EA 22	0.654666	AA 22	0.885161
EE 23	0.752272	EA 23	0.582	AA 23	0.863369
EE 24	0.71937	EA 24	0.830051	AA 24	0.903242
EE 25	1.015022	EA 25	0.683387	AA 25	0.798245
EE 26	1.711025	EA 26	0.824362	AA 26	0.921747
EE 27	0.995953	EA 27	0.722028	AA 27	0.976716
EE 28	0.711022	EA 28	0.654475	AA 28	0.72835
EE 29	0.77104	EA 29	0.683088	AA 29	1.053465
EE 30	0.925151	EA 30	0.643386	AA 30	0.902152

Fonte: A autora



Tabela G.6 - Dados dos coeficientes k sem outliers

EE 1	EA 1	AA 1
0.531343	0.78751	0.990697
0.616204	0.630435	0.747858
0.601087	0.663213	1.029173
0.644862	0.616753	0.943789
0.615022	0.702489	1.000322
0.479275	0.656094	1.137794
0.647383	0.651248	0.96871
0.571084	0.717913	1.082212
0.637006	0.645794	0.956534
0.790658	0.710235	0.94559
0.54381	0.752422	1.006292
0.635153	0.674161	1.126067
0.667051	0.632024	0.943994
0.702595	0.641927	0.850443
0.969137	0.708324	1.192838
0.695171	0.790816	0.780242
0.786231	0.573567	1.028183
0.800283	0.663357	1.022989
0.895724	0.711123	0.885161
0.787235	0.654666	0.863369
0.812164	0.582	0.903242
0.752272	0.683387	0.798245
0.71937	0.722028	0.921747
1.015022	0.654475	0.976716
0.995953	0.683088	1.053465
0.711022	0.643386	0.902152
0.77104		
0.925151		

Fonte: A autora

