

AVALIAÇÃO DE COEFICIENTES DE CORREÇÃO DO TEOR DE UMIDADE PARA PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MADEIRAS DA CLASSE DE RESISTÊNCIA D40

Isabella Silva Menezes Simões¹

<https://orcid.org/0000-0002-8493-4622>

André Luis Christoforo²

<https://orcid.org/0000-0002-4066-080X>

Francisco Antonio Rocco Lahr³

<https://orcid.org/0000-0002-3510-8498>

RESUMO

A umidade é uma variável que influencia diretamente na resistência e rigidez da madeira. Logo, um teor de umidade igual a 12% é estabelecido como condição padrão para os critérios de dimensionamento de projetos de estruturas de madeira descritos pela norma brasileira ABNT NBR 7190-1:2022. Caso o corpo de prova apresente teor de umidade diferente do padrão durante o ensaio, as propriedades mecânicas obtidas devem ser corrigidas. As duas equações de correção normativas se diferenciam quanto ao coeficiente de correção para propriedades de resistência e rigidez. No entanto, a generalidade desses coeficientes e sua imprecisão em determinados casos geram preocupações quanto à segurança estrutural. Diante o exposto, o objetivo desse estudo foi determinar coeficientes de correção do teor de umidade mais representativos para espécies de madeiras da classe de resistência D40 e avaliar os impactos dos coeficientes propostos e normativos no projeto estrutural de uma cobertura de treliças planas em madeira. Para isso, foram conduzidos ensaios de pares gêmeos de corpo de prova em dois teores de umidade: 12% e 25%. Os resultados demonstraram que o coeficiente de correção normativo brasileiro não representa com precisão a variação das propriedades mecânicas em função do teor de umidade para as espécies avaliadas, apresentando um comportamento não conservador na maioria das situações investigadas. Adicionalmente, devido ao modo de ruptura frágil associado à resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, essa propriedade apresentou maior variação entre as estimativas obtidas nos diferentes cenários.

Palavras-chave

Umidade; Caracterização; Madeira de florestas tropicais; Coeficientes normativos; Norma Brasileira.

Submetido em: 29/09/2026 – Aprovado em: 16/10/2026 – Publicado em: 16/10/2026

¹ Doutoranda, Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, São Paulo, ismenezes@estudante.ufscar.br.

² Docente/Doutor, Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, São Paulo, alchristoforo@ufscar.br.

³ Docente/Doutor, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, frocco@sc.usp.br.



EVALUATION OF MOISTURE CONTENT CORRECTION COEFFICIENTS FOR MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD IN STRENGTH CLASS D40

ABSTRACT

Moisture is a variable that directly influences the strength and stiffness of wood. Therefore, a moisture content of 12% is established as a standard condition for the design criteria of wooden structures described by Brazilian standard ABNT NBR 7190-1:2022. If the test specimen has a moisture content different from the standard during the test, the mechanical properties obtained must be corrected. The two normative correction equations differ in terms of the correction coefficient for strength and stiffness properties. However, the generality of these coefficients and their inaccuracy in certain cases raise concerns about structural safety. Given the above, the objective of this study was to determine more representative moisture content correction coefficients for wood species in strength class D40 and to evaluate the impacts of the proposed and standard coefficients on the structural design of a flat wooden truss roof. To this end, twin specimen tests were conducted at two moisture contents: 12% and 25%. The results demonstrated that the Brazilian normative correction coefficient does not accurately represent the variation in mechanical properties as a function of moisture content for the species evaluated, exhibiting non-conservative behavior in most of the situations investigated. Additionally, due to the brittle failure mode associated with parallel-to-grain shear strength, this property exhibited the greatest variation among the estimates obtained under the different scenarios.

Keywords

Moisture; Characterization; Tropical Forest wood; Normative coefficients; Brazilian standard.

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material renovável que apresenta excelentes propriedades mecânicas (Christoforo *et al.*, 2020) e, por essa razão, pode ser utilizada em projetos estruturais de residências e pequenos edifícios (Araújo *et al.*, 2016; Pan *et al.*, 2019), com ampla aplicação no Brasil em estruturas de cobertura. No entanto, suas propriedades mecânicas podem ser influenciadas pela umidade (Fu; Guan; Kei, 2021), variável tão importante que normas de projeto de estruturas de madeira geralmente definem um teor de umidade padrão a ser considerado para o dimensionamento (CEN EN 384, 2010; ASTM D1990-19, 2019; ABNT NBR 7190-1, 2022a; ISO 13061, 2014a, 2014b, 2014c, 2014d, 2017, 2022).

As diretrizes normativas para o dimensionamento de estruturas de madeira estabelecidas pela norma brasileira NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) considera que os valores característicos das propriedades de resistência e de rigidez devem estar no teor de umidade padrão igual a 12%, antes de serem transformados em valores característicos e aplicados nas verificações de dimensionamento.

Ao projetar a estrutura de um ambiente construído utilizando determinada espécie de madeira, os dados amostrais de caracterização dessa espécie obtidos nos ensaios experimentais são utilizados para a determinação dos valores característicos. No entanto, esses dados podem não ter sido obtidos no teor de umidade padrão, especialmente em um país de extensão continental e grande variação climática, como o Brasil.

Nesses casos, os valores amostrais das propriedades devem ser corrigidos para o teor de umidade padrão utilizando as equações normativas. Essas equações normativas indicam que, a cada variação de 1% do teor de umidade, as propriedades de resistência e rigidez são ajustadas em 3% e 2%, respectivamente. Desse modo, quando o teor de umidade é superior ao padrão, as propriedades devem ser majoradas, e quando é inferior, devem ser reduzidas.

Após a correção dos dados experimentais, os valores característicos das propriedades são calculados como estabelecido na NBR 7190-3 (ABNT, 2022b) e utilizados no dimensionamento estrutural. Todavia, esse método de correção não faz distinção entre as classes de resistência, espécies ou tipos de solicitação, admitindo um comportamento higroscópico uniforme. Considerando espécies e classes de resistência distintas, diversos estudos (Arroyo *et al.*, 2023; Aquino *et al.*, 2022a; Aquino *et al.*, 2022b; Arroyo *et al.*, 2022; Fraga *et al.*, 2022a; Ruthes *et al.*, 2022; Soares *et al.*, 2021) constataram uma discrepância entre os valores obtidos experimentalmente e aqueles previstos pelas equações normativas, refutando a hipótese admitida de uniformidade e evidenciando a necessidade de uma correção que garanta um dimensionamento estrutural adequado.

Ressalta-se que, a depender do caso, as propriedades podem estar sendo subestimadas, levando a um acréscimo de consumo de madeira desnecessário, ou superestimadas, comprometendo a segurança e o desempenho da estrutura.

Uma possibilidade é que os coeficientes de correção do teor de umidade estabelecidos pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) não sejam representativos para qualquer espécie, ou para um conjunto de espécies dentro de uma mesma classe de resistência. Diante o exposto, esse trabalho teve como objetivo estimar os coeficientes de correção do teor de umidade para a classe de resistência D40 e avaliar os impactos dos coeficientes estimados e normativos no projeto estrutural de uma cobertura de treliças planas em madeira.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) apresenta duas equações para a correção do teor de umidade que devem ser aplicadas quando o corpo de prova não se encontra no teor de umidade padrão (12%), mas dentro do intervalo de 10% a 25%: uma para propriedades de resistência (Equação 1) e outra para propriedades de rigidez (Equação 2).

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

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

Nas quais, f se refere às propriedades de resistência e E às propriedades de rigidez. O número 12 indica a umidade de equilíbrio padrão de 12%, enquanto U representa uma umidade diferente de 12% no qual o corpo de prova se encontrava no momento do ensaio (variando de 10 a 25%).

Genericamente, tem-se a Equação 3 que enfatiza que os coeficientes 3 e 2 da norma, aqui denominados coeficientes K , são os coeficientes de correção da umidade.

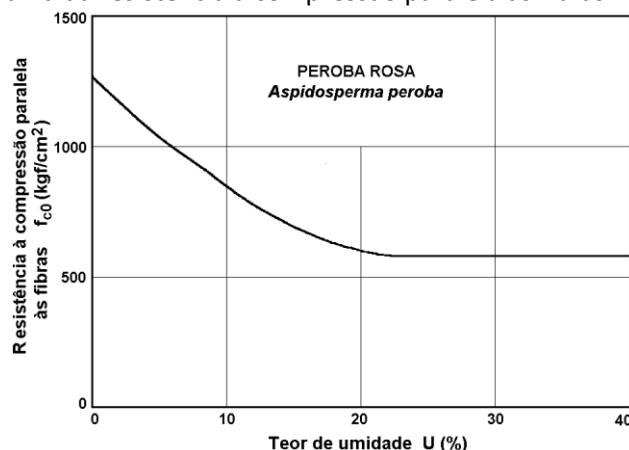
$$X_{12} = X_U \cdot \left[1 + \frac{K(U - 12)}{100} \right] \quad \text{Eq. 3}$$

O termo K é o coeficiente angular que indica a taxa de variação da propriedade em relação a umidade, ou seja, ele representa a variação percentual da propriedade para cada 1% de variação no teor de umidade. Os valores de K indicados pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) correspondem a uma variação de 3% para as propriedades de resistência e 2% para as propriedades de rigidez.

Esses modelos normativos assumem uma variação linear e generalizada, presumindo que todas as propriedades de resistência e de rigidez são influenciadas pela umidade da mesma maneira, independente da classe de resistência.

No entanto, o coeficiente $K=3$ foi estabelecido com base em um diagrama da NBR 6230 (ABNT, 1980) *apud* Logsdon (1998, p. 9), que relacionava a resistência a compressão paralela às fibras com o teor de umidade (Figura 1), obtido experimentalmente, conforme a NBR 6230 (ABNT, 1980), para a espécie de madeira Peroba Rosa (*Aspidosperma peroba*). Já o coeficiente $K=2$ derivou-se de uma relação entre a rigidez e a resistência da madeira, além de ensaios complementares.

Figura 1. Diagrama da resistência a compressão paralela às fibras X teor de umidade



Fonte: NBR 6230 (ABNT, 1980) *apud* Logsdon (1998, p. 9).

O fato de os coeficientes normativos serem oriundos da análise de apenas uma espécie também corrobora para justificar a realização desse trabalho.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho compreendeu uma etapa experimental de caracterização, com intuito de subsidiar a determinação do coeficiente K , bem como análises estatísticas e de projeto voltadas à avaliação dos resultados e à aplicação prática dos coeficientes obtidos.

3.1 Caracterização

Todos os ensaios foram realizados de acordo com as premissas descritas na NBR 7190-3 (ABNT, 2022b), norma que regulamenta a caracterização de madeiras provenientes de florestas nativas. Ao todo foram estimadas 15 propriedades, listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades físicas e mecânicas avaliadas

Propriedade	Sigla
Densidade Aparente	ρ_{ap}
Retração radial total	$\varepsilon_{r,2}$
Retração tangencial total	$\varepsilon_{r,3}$
Resistência à compressão paralela às fibras	f_{c0}
Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras	E_{c0}
Resistência à tração paralela às fibras	f_{t0}
Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras	E_{t0}
Resistência convencional no ensaio de flexão estática	f_M
Módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática	E_{M0}
Resistência à tração normal às fibras	f_{t90}
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras	f_{v0}
Resistência ao fendilhamento	f_{s0}
Dureza paralela às fibras	f_{H0}
Dureza normal às fibras	f_{H90}
Tenacidade	W

Fonte: Os autores (2026).

Para o desenvolvimento desse trabalho, seria suficiente apenas abordar todas as propriedades de resistência e de rigidez, devido as mesmas serem empregadas em projetos estruturais para dimensionamento e sofrerem variações significativas devido a umidade. No entanto, as propriedades físicas (ρ_{ap} , $\varepsilon_{r,2}$, $\varepsilon_{r,3}$), a dureza (f_{H0} , f_{H90}) e a tenacidade (W) foram obtidas em caráter adicional para uma melhor caracterização dos lotes de espécies utilizados. No total foram realizadas 1344 determinações.

3.1.1 Materiais, equipamentos e condições de ensaio

A espécie Rabo de arraia (*Vochysia sp*) e Cafearana (*Andira stipulacea*), ambas da classe de resistência D40, foram as utilizadas no presente trabalho. Lotes homogêneos de madeiras dessas duas espécies foram fornecidos por uma empresa da região com certificação FSC®, que indica ser originada de manejo florestal responsável.

As peças de madeira de cada espécie foram fornecidas na condição verde. Inicialmente, essas peças foram divididas em duas partes simétricas, denominadas 'gêmeas', uma vez que ambas provinham da mesma peça original, assegurando similaridade nas propriedades físicas e mecânicas. Uma das partes foi utilizada para extração imediata dos corpos de prova na condição verde (saturada – 25%), que foram então submetidos aos ensaios. A outra parte foi armazenada por cinco meses no pátio do laboratório, permitindo que o teor de umidade se estabilizasse em torno de 12%. Somente após a estabilização, os corpos de prova foram extraídos e ensaiados na condição de equilíbrio.

No momento dos ensaios, cada corpo de prova teve o teor de umidade aferido por meio de um medidor de umidade por contato da Marrari®, modelo M52. Na condição verde, o teor de umidade obtido foi igual ou superior a 25%, valor a partir do qual as propriedades de rigidez e resistência da madeira apresentam variações consideradas insignificantes em função da umidade. Já na condição de equilíbrio, o intervalo de variação da umidade foi de 11,32% a 12,47%.

A máquina universal de ensaios AMSLER® com capacidade de carregamento de 250kN foi utilizada para determinação de todas as propriedades mecânicas, com exceção da determinação da tenacidade que foi utilizada a máquina pêndulo do laboratório.

3.2 Cálculo do K

Com os resultados obtidos experimentalmente nas duas condições de umidade, foi possível calcular o coeficiente K. Isolando-o da Equação 3, tem-se a Equação 4 para o cálculo do coeficiente de correção.

$$K = 100 \cdot \left[\frac{X_{12} - X_U}{X_U \cdot (U - 12)} \right] \quad \text{Eq. 4}$$

onde, X é a propriedade (resistência ou rigidez), 12 refere-se à umidade padrão de 12% e U, para o cálculo de K, é referente a umidade de 25% da madeira saturada ensaiada.

Para propor um novo coeficiente, os dados de K foram agrupados e analisados estatisticamente com o objetivo de avaliar se a proposta deveria seguir o modelo presente na NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), que considera um único coeficiente para resistência e outro para rigidez em todas as classes de resistência (cenário A), ou se esses coeficientes deveriam ser subdivididos por classe de resistência da madeira (cenário B) ou por tipo de propriedade (cenário C).

3.3 Análise estatística

Além da estatística descritiva das propriedades obtidas experimentalmente, também foram realizadas análises estatísticas inferenciais.

Para a estatística inferencial, como os dados são amostrais e a dispersão da população é desconhecida, a distribuição t de Student foi considerada mais adequada. Assim, com o auxílio do software MiniTab®, aplicou-se o teste t para uma amostra, com nível de confiança de 95%, a fim de calcular o Intervalo de Confiança (IC), conforme descrito na Equação 5.

$$IC = \bar{X} \pm t_{(n-1, \alpha/2)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Eq. 5}$$

Na qual, $\bar{X}$ é a média amostral, n é o tamanho da amostra, α é o nível de significância dado por $1 - (\text{nível de confiança})$, $t_{(n-1, \alpha/2)}$ é o valor crítico da distribuição t de Student para $n-1$ graus de liberdade e nível de significância e s é o desvio padrão amostral.

O intervalo de confiança foi calculado e o limite inferior foi adotado para propor um novo coeficiente K baseado nos dados amostrais. Essa abordagem prioriza a segurança, considerando que o coeficiente K corrige valores de resistência e rigidez utilizados como parâmetros em projetos estruturais.

Além dos intervalos de confiança calculados diretamente com os dados amostrais, foram também determinados intervalos de confiança baseado em percentis gerados pela técnica de reamostragem bootstrap. Essa abordagem foi escolhida para aumentar a robustez da análise, devido ao tamanho limitado das amostras. Ainda com o auxílio do software MiniTab® foram consideradas 1.000.000 simulações de reamostragem, nas quais, em cada simulação, um valor da amostra original foi selecionado aleatoriamente e substituído por outro valor da própria amostra, gerando múltiplas reamostras. Comparando os intervalos de confiança obtidos a partir dos dados amostrais e aqueles calculados por reamostragem bootstrap, foi possível avaliar a representatividade dos dados amostrais.

3.4 Análise do projeto

Uma análise de projeto foi realizada com o intuito de compreender o impacto dos coeficientes propostos em relação aos atuais coeficientes normativos, com o auxílio do software iTruss®, descrito em Fraga *et al.* (2022b). A estrutura investigada foi uma estrutura de cobertura treliçada plana de um galpão para utilização como depósito, com 24 metros de comprimento e pé direito livre de 7 metros. Como geometria da treliça, optou-se pela tipologia Howe, com 12 metros de vão e a inclinação ótima de 12° encontrada por Menezes (2022) para essas características geométricas. O espaçamento entre treliças utilizado nesse tipo de cobertura foi de 4 metros.

O dimensionamento foi realizado considerando a classe de carregamento de longa duração, a classe umidade 1 e a menor altura possível para cada elementos da estrutura. Com exceção das terças e dos montantes da treliça que foram considerados como peça única de 6 centímetros de largura, o demais elementos foram considerados peças compostas de duas partes com 3 centímetros de largura e distância entre as partes de 6 centímetros para os banzos e 12 centímetros para as diagonais. Além disso, foram consideradas as ações atuantes e as vinculações especificadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Ações atuantes, coeficientes e vinculações adotadas no projeto

Informação	Subdivisão	Modo de obtenção, tipo ou valor adotado
Ações	Peso próprio	Calculado pelo software a cada iteração de acordo com a geometria e dados fornecidos do material.
	Permanente	-0,30 kN/m ²
	Sobrecarga	-0,25 kN/m ²
	Vento	Vs=40 m/s; Terreno plano
		Rugosidade do Terreno: Categoria IV Grupo de edificação 3
Coeficientes das ações	Permanentes	$\gamma_g=1,4$
	Variável de construção	$\gamma_q=1,4; \psi_0=0,7; \psi_1=0,6; \psi_2=0,4;$
	Variável de Ventos	$\gamma_q=1,4; \psi_0=0,6; \psi_1=0,3; \psi_2=0,0;$
	Variável de Sobrecarga	$\gamma_q=1,5; \psi_0=0,7; \psi_1=0,6; \psi_2=0,4;$
Vinculações das treliças	Tipo de vínculo	Simplesmente apoiada
	Modelo de cálculo das ligações	Modelo I (Fraga <i>et al.</i> , 2022b)

Fonte: Os autores (2026).

Para cada uma das espécies estudadas foram realizadas quatro simulações, cuja as únicas diferenças entre os cenários foram os valores das propriedades de resistência e rigidez requeridas pelo programa de computador utilizado no dimensionamento do projeto estrutural, que são a resistência à compressão paralelas às fibras característica, a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras característica e o módulo de elasticidade à compressão paralelo às fibras médio.

Antes de se obter essas propriedades, os dados obtidos no ensaio experimental referente às propriedades descritas a cima de cada espécie no teor de umidade de 25% foram corrigidos para a umidade padrão de 12%, considerando o coeficiente K normativo (ABNT, 2022a) no cenário A e os coeficientes K propostos no Cenário B e C. Além disso, um cenário de referência também foi analisado, considerando os valores experimentais de cada espécie já no teor de umidade de 12%, sem necessidade de correção. Em cada cenário, a partir dos dados amostrais corrigidos ou obtidos em teor de umidade de 12%, foram calculados o valor médio da propriedade de rigidez e os valores característicos de resistência (x_{wk}) atendendo as condições da Equação 6. Para isso, os valores individuais (x_i) foram ordenados de maneira crescente, sendo x_1 o menor valor e x_n o maior, observando as limitações de valores com base no valor médio da amostra completa ($\bar{X}$). Tudo de acordo com o estabelecido na NBR 7190-3 (ABNT, 2022b).

$$\bar{X} > x_{wk} \geq \left\{ 1,1 \cdot \left(2 \cdot \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} - x_{\frac{n}{2}} \right) \right\} \quad \text{Eq. 6}$$

As propriedades mecânicas estimadas para cenários A, B e C foram comparadas àquelas do cenário de referência, possibilitando a avaliação do comportamento conservador dos respectivos coeficientes. Adicionalmente, os volumes totais de madeira empregados no projeto foram obtidos com auxílio do software para cada cenário, de modo a observar as consequências, no dimensionamento, da utilização dos diferentes valores de propriedade.

Para comparação, a variação das propriedades mecânicas em cada cenário em relação ao cenário de referência foi calculada pela Equação 7.

$$\Delta_x(\%) = \frac{x_{wk|cenário\ A,B\ ou\ C} - x_{wk|cenário\ referência}}{x_{wk|cenário\ referência}} \cdot 100 \quad \text{Eq. 7}$$

Desse modo, variações positivas indicam comportamento não conservador, uma vez que implicam a consideração de uma capacidade de resistência ou rigidez superior àquela efetivamente observada experimentalmente. Por outro lado, variações negativas indicam valores inferiores ao observados no cenário de referência, sendo considerado um comportamento conservador.

4 RESULTADOS

A estatística descritiva das propriedades determinadas experimentalmente é apresentada na Tabela 3 e Tabela 4. O coeficiente de variação (CV) das propriedades, com exceção de W e f_{H90} , ficou dentro dos 28% estabelecido para consideração de lote homogêneo em propriedades oriundas de esforços tangenciais. Para propriedades provenientes de esforços normais a NBR 7190-1 (ABNT, 2022) estabelece um CV de 18% para essa consideração, contudo tem-se o consenso de que pode ser difícil atingir esse valor em propriedades de rupturas frágeis, como tração paralela às fibras e cisalhamento paralelo às fibras, em algumas espécies de madeira.

Tabela 3 – Estatística descritiva espécie Cafearana (*Andira stipulacea*)

Propriedade	Unid. $\bar{X}$	U=25%		U=12%	
		$\bar{X}$	CV (%)	$\bar{X}$	CV (%)
ρ_{ap}	g/cm ³	0,873	6,048	0,668	8,388
$\varepsilon_{r,2}^*$	%	-	-	-	-
$\varepsilon_{r,3}^{**}$	%	-	-	-	-
f_{c0}	MPa	34,583	7,939	57,583	17,893
E_{c0}	MPa	59,583	27,433	79,983	26,300
f_{t0}	MPa	2,242	26,864	3,083	26,917
E_{t0}	MPa	7,950	13,743	9,108	26,105
f_M	MPa	0,500	22,563	0,525	25,844
E_{M0}	MPa	58,833	18,261	90,967	25,072
f_{t90}	MPa	11122,500	14,606	14089,450	26,055
f_{v0}	MPa	11295,275	19,004	13211,508	20,171
f_{s0}	MPa	10410,925	13,811	13656,075	16,316
f_{H0}	MPa	46,583	17,878	80,458	26,623
f_{H90}	MPa	29,917	20,180	47,592	26,447
W	daN·m	0,679	27,720	0,718	41,370

Nota:

* $\bar{X} = 5,435$; CV (%) = 15,407** $\bar{X} = 9,758$; CV (%) = 9,486

Fonte: Os autores (2026).

Tabela 4 – Estatística descritiva espécie Rabo de arraia (*Vochysia sp.*)

Propriedade	Unid. $\bar{X}$	U=25%		U=12%	
		$\bar{X}$	CV (%)	$\bar{X}$	CV (%)
ρ_{ap}	g/cm ³	0,919	6,368	0,727	6,410
$\varepsilon_{r,2}^*$	%	-	-	-	-
$\varepsilon_{r,3}^{**}$	%	-	-	-	-
f_{c0}	MPa	45,500	12,729	56,833	17,986
E_{c0}	MPa	65,500	26,528	68,642	25,657
f_{t0}	MPa	1,800	27,217	2,958	25,109
E_{t0}	MPa	12,000	16,667	13,400	21,917
f_M	MPa	0,675	12,830	0,467	27,915
E_{M0}	MPa	76,083	20,928	77,458	27,728
f_{t90}	MPa	12521,750	14,115	13402,108	15,548
f_{v0}	MPa	12798,333	10,818	13868,875	21,595
f_{s0}	MPa	11632,250	14,102	13809,217	20,405
f_{H0}	MPa	62,083	13,414	85,692	10,632
f_{H90}	MPa	44,000	30,058	51,850	8,087
W	daN·m	1,087	30,834	0,714	35,483

Nota:

* $\bar{X} = 3,587$; CV (%) = 24,916** $\bar{X} = 7,028$; CV (%) = 18,825

Fonte: Os autores (2026).

Com os pares gêmeos ensaiados nas duas condições de umidade (em 25% e 12%), os coeficientes K foram calculados para cada par de gêmeos. O valor médio de cada coeficiente K considerando às duas espécies da classe de resistência D40 para as propriedades de resistência e de rigidez é apresentado na Tabela 5.

Por serem valores médios, eles não foram os adotados como proposta de coeficientes para classe D40. Com intuito de uma abordagem conservadora, foi realizada ainda uma inferência estatística que calculou os intervalos de confiança inferiores e superiores e os coeficientes propostos são baseados nos limites inferiores, também apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficiente K médio ($\bar{K}$) e intervalo de confiança (IC) de 95%

Propriedade	$\bar{K}$	IC _{95%}	
		Inf.	Sup.
f_{c0}	3,612	2,447	4,777
f_{t0}	1,805	0,682	2,928
f_{v0}	1,031	0,321	1,741
f_M	2,219	0,932	3,505
Resistência Geral	2,167	1,616	2,717
E_{c0}	1,420	0,483	2,357
E_{t0}	1,032	0,375	1,690
E_{M0}	1,980	1,282	2,678
Rigidez Geral	1,477	1,043	1,912

Fonte: Os autores (2026).

Além do cálculo do coeficiente K por propriedade, para efeito de comparação com os coeficientes normativos vigentes, foram calculados um valor de coeficiente K considerando todos os referentes a propriedades de resistência e outro coeficiente K para todos os referentes a propriedades de rigidez, sendo apresentados em negrito na Tabela 5 como Resistência Geral e Rigidez Geral, respectivamente.

A abordagem de reamostragem bootstrap também foi aplicada e os resultados são apresentados na Tabela 6. Ao comparar os valores da Tabela 5 com o da Tabela 6, constata-se que os valores obtidos por meio da limitada amostra estão próximos e ligeiramente conservadores ao da reamostragem com 10.000 amostras. Assim, os valores amostrais da Tabela 5 demonstraram-se coerentes.

Tabela 6 – Coeficiente K médio ($\bar{K}$) e intervalo de confiança (IC) de 95% por reamostragem bootstrap

Propriedade	Bootstrap (10000 reamostras)		
	$\bar{K}$	IC _{95%,inf}	IC _{95%,sup}
f_{c0}	3,615	2,557	4,720
f_{t0}	1,803	0,804	2,880
f_{v0}	1,031	0,368	1,687
f_M	2,219	1,034	3,412
Resistência Geral	2,167	1,630	2,710
E_{c0}	1,420	0,584	2,309
E_{t0}	1,030	0,421	1,628
E_{M0}	1,982	1,329	2,657
Rigidez Geral	1,477	1,055	1,901

Fonte: Os autores (2026).

Na aplicação dos coeficientes em uma situação real de projeto, para comparação do seu respectivo impacto, foram consideradas, além da avaliação dos coeficientes normativos (ABNT, 2022a), também a avaliação dos coeficientes obtidos a partir dos dados amostrais, considerando a mesma estratégia aplicada pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), que apresenta um coeficiente para propriedades de resistência e outro para propriedades de rigidez e a estratégia apresentada em normas internacionais de um coeficiente para propriedades de rigidez e um coeficiente para cada tipo de propriedade de resistência. Esses três cenários e seus respectivos coeficientes aplicados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Coeficientes K utilizados em cada situação de simulação

Cenários	Descrição	Tipo	Coeficiente K
A	Coeficiente adotado pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022), dividido em dois grupos de tipos: propriedades de resistência e propriedades de rigidez.	Resistência	3
		Rigidez	2
B	Coeficientes propostos nesse trabalho, seguindo os dois grupos de tipos: propriedades de resistência e propriedades de rigidez.	Resistência	1,616
		Rigidez	1,043
C	Coeficientes propostos nesse trabalho para cada propriedade na classe da espécie	f_{c0}	2,447
		f_{v0}	0,321
		E_{c0}	0,483

Fonte: Os autores (2026).

Os coeficientes foram avaliados em uma situação real de projeto. Em todos os cenários, foram mantidos os mesmos parâmetros de projetos, exceto os dados de entrada quanto às propriedades da madeira, especificamente a resistência a compressão paralela às fibras característica, a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras característica e o módulo de elasticidade à compressão paralelo às fibras médio.

Esses valores foram determinados a partir dos dados amostrais da madeira verde (25%) corrigidos para o teor de umidade de 12%, por meio da Equação 3 utilizando os coeficientes de correção apresentados na Tabela 7 em cada cenário. Especificamente, após a correção dos valores amostrais, foram calculados a média do módulo de elasticidade e os valores característico da resistência a compressão e ao cisalhamento paralelo às fibras por meio da Equação 6, organizando os valores em ordem crescente e respeitando as condições estabelecidas pela norma. Nota-se que, nos cenários A e B, tanto a resistência a compressão paralela às fibras como a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras utilizam o mesmo coeficiente K referente ao tipo de propriedades de resistência.

Para comparação, além dos cenários já descritos, também foram determinados os valores característicos e médio com os dados amostrais no teor de umidade de 12%, sendo considerado a situação ou o coeficiente real do lote da espécie utilizado, chamado neste trabalho de cenário de referência.

Os valores das propriedades inseridos no software, a variação das propriedades nos cenários A, B e C cenário de referência e o volume total de madeira são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades utilizadas no projeto, variação em relação à referência e volume total de madeira

Espécie	Cenário	Dados de entrada							Resultado do Projeto
		ρ_{ap} (kg/m ³)	$f_{c0,k}$ (MPa)	$\Delta_{f_{c0,k}}$ (%)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$\Delta_{f_{v0,k}}$ (%)	$E_{c0,m}$ (GPa)	$\Delta_{E_{c0,m}}$ (%)	Volume total de madeira (m ³)
Cafearana	A	0,668	43,118	-0,06	9,174	31,96	15,461	9,73	6,83
	B		37,537	-12,99	7,987	14,88	13,459	-4,47	7,75
	C		40,888	-5,23	6,875	-1,10	11,821	-16,10	8,67
	Referência		43,142	0,00	6,952	0,00	14,090	0,00	7,41
Rabo de arraia	A	0,727	51,986	10,63	13,900	48,19	17,405	29,87	6,28
	B		45,257	-3,69	12,101	29,01	15,152	13,06	6,93
	C		49,297	4,91	10,417	11,06	13,308	-0,70	7,77
	Referência		46,992	0,00	9,380	0,00	13,402	0,00	7,72

Nota: Os valores obtidos nos cenários A, B e C são considerados conservadores quando inferiores aos observados no cenário de referência ($\Delta < 0$).

Fonte: Os autores (2026).

Na espécie Cafearana, a estimativa da resistência a compressão paralela às fibras foi conservadora em todos os cenários avaliados, sendo o coeficiente normativo (ABNT, 2022a) do cenário A o que apresentou uma menor variação, de apenas 0,06% do valor obtido experimentalmente no cenário de referência.

Quanto à resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, os cenários A e B resultaram em estimativas não conservadoras, o coeficiente normativo aplicado no cenário A foi o que apresentou uma maior variação igual a 31,96% do valor de referência, o cenário C foi o único que estimou de maneira conservadora a propriedade, com uma variação de -1,10%. O módulo de elasticidade de compressão paralelo às fibras médio foi estimado de modo conservador pelo cenário B e C, o que apresentou menor variação foi o cenário B com apenas -4,47%.

Na espécie Rabo de arraia, a resistência a compressão paralela às fibras foi estimada com conservadorismo apenas no cenário B, com variação de apenas -3,69%. A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras não foi conservadora em nenhuma das estimativas analisadas, contudo, o coeficiente de correção definido a partir de dados amostrais considerando somente a propriedade em questão (cenário C) foi o mais próximo com uma variação de 11,06%, contrastando com a variação dos coeficientes de correção definidos a partir de dados amostrais de um grupo de propriedades de resistência, de 29,01% e 48,19%, respectivamente cenário B e cenário A.

A estimativa conservadora do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras médio foi conservadora apenas no cenário C com uma variação de apenas -0,70%.

Ainda que a resistência a compressão paralela às fibras tenha sido a propriedade considerada para estimar o coeficiente normativo (ABNT, 2022a) utilizado na correção do teor de umidade de propriedades de resistência, nas condições avaliadas nesse trabalho, ele demonstrou não ser representativo para estimar a propriedade em questão na espécie Rabo de Arraia. Contudo, o contrário foi observado na estimativa da propriedade na espécie Cafearana. Isso reforça a justificativa do trabalho. Uma alternativa proposta foi o cenário B, que considerou não somente os dados amostrais referente a resistência à compressão paralela às fibras, mas também o de outras propriedades de resistência, das duas espécies analisadas e, o coeficiente de correção assim definido, realizou uma estimativa conservadora da resistência à compressão paralela às fibras característica para a espécie Rabo de arraia.

Esse resultado demonstra que, para a resistência à compressão paralela às fibras característica da espécie Rabo de arraia, o coeficiente de correção que melhor representa a variação de resistência de um corpo de prova para cada 1% da variação do teor de umidade, na metodologia utilizada, não foi o coeficiente normativo (ABNT, 2022a) igual a 3 e sim o coeficiente proposto no cenário B igual a 1,616. O contrário é válido para a espécie Cafearana. O coeficiente de 2,447 do cenário C não foi o melhor para estimar a resistência à compressão paralela às fibras característica para nenhuma das espécies avaliadas.

Por possuir um modo de ruptura frágil, a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras característica apresenta estimativas menos representativas quando utilizados os coeficientes de correção do cenário A e do cenário B, que englobam os dados amostrais de um grupo de propriedades de resistência com diferentes modos de ruptura. A estimativa mais próxima da referência foi considerando o coeficiente de correção definido a partir de dados amostrais exclusivamente do próprio tipo de propriedade (cenário C), embora o caráter conservador tenha sido observado apenas para a espécie Cafearana.

A propriedade de rigidez avaliada não apresentou estimativa conservadora com o coeficiente normativo (cenário A), reforçando novamente a falta de representatividade desse coeficiente na estimativa do comportamento da rigidez em relação ao teor de umidade. Para a espécie Cafearana, o coeficiente que considerou um grupo de propriedades de rigidez em sua estimativa (cenário B) apresentou o resultado mais próximo da referência. No entanto, o cenário C foi o único a estimar essa propriedade de forma conservadora para a espécie Rabo de arraia, que também apresentou uma estimativa conservadora para a espécie Cafearana, porém com uma variação maior que a observada no cenário B.

As três propriedades analisadas foram estimadas de modo conservador simultaneamente somente no cenário C e somente para a espécie Cafearana. Em projeto, esse conservadorismo representou um aumento de consumo de 16,99% em relação ao consumo obtido no cenário de referência com valores experimentais e de 27,05% em relação ao cenário A normativo (ABNT, 2022a).

Ainda que o cenário A tenha sido o que apresentou o menor volume total de madeira para ambas as espécies, o valor resistente característico estimado a partir da correção para as maiorias das propriedades foi acima daquele obtido no cenário de referência, partindo de valores amostrais ensaiados a 12%, uma situação “real” sem a utilização de coeficientes. Assim, pelos critérios adotados nesse trabalho o coeficiente normativo (ABNT, 2022a), utilizado no cenário A, apresentou comportamento não conservador nas maiorias das propriedades avaliadas em ambas as espécies analisadas. No entanto, esses resultados não são suficientes para indicar a segurança dos da estrutura uma vez que o dimensionamento possui outros critérios e coeficientes de segurança.

Logo, ao avaliar os efeitos da adoção de diferentes coeficientes de correção em um projeto de cobertura, essa análise não buscou pelo cenário que apresentou o menor volume total de madeira, mas sim verificou de maneira geral as consequências práticas das diferentes estratégias em relação a definição do coeficiente de correção por estratégias distintas, considerando a classe de resistência.

Por fim, é possível observar que apesar de ambas as espécies serem classificadas na mesma classe de resistência D40, é possível que cada uma possua características inerentes a espécie. Diante dos cenários propostos (cenário B e C) no presente trabalho, nos quais os coeficientes foram definidos a partir de dados amostrais das próprias espécies analisadas, observou-se que o comportamento conservador apresenta maior representatividade para a espécie Cafearana do que para a espécie Rabo de arraia.

Considerando o estágio ainda inicial das investigações sobre o tema, a quantidade de espécies avaliadas constitui uma limitação quanto à generalização dos resultados para toda a classe de resistência D40, sendo recomendável a ampliação do número de espécies investigadas da classe de resistência em estudos futuros.

5 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos, nas condições e espécies avaliadas, foi possível concluir que:

- a estimativa da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras característica obtida pelos coeficientes de correção que consideraram outras propriedades de resistência em sua definição superestima essa resistência, desconsiderando seu modo de ruptura frágil, o que indica possivelmente que a variação desse tipo de resistência é menor que as demais propriedades avaliadas em função do teor de umidade;
- a utilização do coeficiente normativo brasileiro (ABNT, 2022a) resultou em estimativas não conservadoras da maioria das propriedades avaliadas, com exceção somente da estimativa da resistência à compressão paralela às fibras da espécie *Cafearana*;
- A amostra conjunta das duas espécies resultou em coeficientes de correção propostos com comportamento conservador mais representativo para a espécie *Cafearana* do que para a espécie *Rabo de arraia*;
- os coeficientes definidos a partir de cada tipo de propriedade (cenário C), para a espécie *Cafearana*, foi a única abordagem que estimou as três propriedades simultaneamente de maneira conservadora e resultou em um aumento de 16,99% no consumo de madeira em relação à referência e de 27,03% em relação ao utilizando o coeficiente normativo vigente;
- não foi possível estabelecer uma abordagem de definição dos coeficientes de correção capaz de estimar valores médios e característicos favoráveis à segurança para ambas as espécies da classe D40;

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D1990-19**: Standard practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from ingrade tests of full-size specimens. West Conshohocken, PA: ASTM, 2019.

AQUINO, V. B. D. M.; SOARES, L. S. Z. R.; RUTHES, H. C.; ARROYO, F. N.; FRAGA, I. F.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Evaluation of moisture content variation on strength and stiffness properties of Cedrella sp. wood specie. **REM - International Engineering Journal**, v. 75, n. 2, p. 111–116, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1590/0370-44672021750069>.

AQUINO, V. B. D. M.; ZANINI RIBEIRO SOARES, L. S.; RUTHES, H. C.; ARROYO, F. N.; FRAGA, I. F.; CHRISTOFORO, A. L.; DOS SANTOS, H. F.; CHAHUD, E.; MELGAÇO NUNES BRANCO, L. A.; ROCCO LAHR, F. A. ANALYSIS OF MOISTURE CONTENT VARIATION ON STRENGTH AND STIFFNESS PROPERTIES OF CEDRELLA ODORATA WOOD SPECIES. **Wood Research**, v. 67, n. 2, p. 231–240, 2022b. DOI: <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/67.2.231240>.

ARAUJO, V. A.; CORTEZ-BARBOSA, J.; GAVA, M.; GARCIA, J. N.; SOUZA, A. J. D.; SAVI, A. F.; MORALES, E. A. M.; MOLINA, J. C.; VASCONCELOS, J. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Classification of wooden housing building systems. **BioResources**, v. 11, n. 3, p. 7889-7901, 2016. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.DeAraujo>.

ARROYO, F. N.; FRAGA, I. F.; RUTHES, H. C.; SOARES, L. S. Z. R.; AQUINO, V. B. D. M.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Influence of moisture content on physical and mechanical properties of Calophyllum sp wood. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 3, p. e70446, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509870446>.

ARROYO, F. N.; FRAGA, I. F.; SOARES, L. S. Z. R.; AQUINO, V. B. D. M.; RUTHES, H. C.; MASCARENHAS, F. J. R.; SANTOS, H. F. D.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Influence of Moisture on Physical and Mechanical Properties of Pouteria Pachycarpa Wood. **Floresta e Ambiente**, v. 29, n. 2, p. e20220019, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087-floram-2022-0019>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6230**: Ensaios físicos e mecânicos de madeiras. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-1**: Projeto de estruturas de madeira: parte 1: critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022a.

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, 2022b.

CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, D. H.; VARANDA, L. D.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. Estimation of wood toughness in Brazilian tropical tree species. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 2, p. 232-237, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p232-237/2020>.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 384**: Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Brussels: CEN, 2010.

FRAGA, I. F.; ARROYO, F. N.; SOARES, L. S. Z. R.; AQUINO, V. B. D. M.; RUTHES, H. C.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Influência do teor de umidade em propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Dipteryx odorata*. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 27, n. 3, p. e20220084, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0084>.

FRAGA, I. F.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; SILVA, S. A. M. da; ARROYO, F. N.; AQUINO, V. B. de M. Influência dos modelos idealizados de ligações no dimensionamento de treliças Howe de madeira. **Revista Principia**, v. 59, n. 3, p. 1028–1050, 2022b. DOI: <https://doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5050>.

FU, W.-L.; GUAN, H.-Y.; KEI, S. Effects of Moisture Content and Grain Direction on the Elastic Properties of Beech Wood Based on Experiment and Finite Element Method. **Forests**, v. 12, n. 5, p. 610, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12050610>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13061-3**: Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 3: Determination of ultimate strength in static bending. Geneva: ISO, 2014a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13061-4**: Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 4: Determination of modulus of elasticity in static bending. Geneva: ISO, 2014b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13061-6**: Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 6: Determination of ultimate tensile stress parallel to grain. Geneva: ISO, 2014c.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13061-7**: Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 7: Determination of ultimate tensile stress perpendicular to grain. Geneva: ISO, 2014d.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13061-8**: Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 8: Determination of ultimate strength in shearing parallel to grain. Geneva: ISO, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13061-17**: Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 17: Determination of ultimate stress in compression parallel to grain. Geneva: ISO, 2017.

LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

MENEZES, I. S. **Influência da inclinação de estruturas de cobertura no consumo de madeira**. 2022. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

PAN, Y.; VENTURA, C. E.; FINN, W. D. L.; XIONG, H. Effects of ground motion duration on the seismic damage to and collapse capacity of a mid-rise woodframe building. **Engineering Structures**, v. 197, 109451, 2019. DOI: <https://doi.org/doi:10.1016/j.engstruct.2019.109451>.

RUTHES, H. C.; MASCARENHAS, F. J. R.; SOARES, L. S. Z. R.; AQUINO, V. B. D. M.; ARROYO, F. N.; FRAGA, I. F.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF Vataírea SP WOOD. **Revista Árvore**, v. 46, p. e4606, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-908820220000006>.

SOARES, L. S. Z. R.; FRAGA, I. F.; PAULA, L. D. S. E.; ARROYO, F. N.; RUTHES, H. C.; AQUINO, V. B. D. M.; MOLINA, J. C.; PANZERA, T. H.; BRANCO, L. A. M. N.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Influence of moisture content on physical and mechanical properties of *Cedrelinga catenaeformis* wood. **BioResources**, v. 16, n. 4, p. 6758–6765, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.6758-6765>.