



2024

Análise da verificação de peças submetidas à compressão e flexo-compressão de acordo com as normas NBR 7190:1997 e NBR 7190:2022

Mislaine Hermann Borges ^a; Christiane Areias Trindade ^b

^a Aluna de Graduação em Engenharia Civil, mislaine_h@ufms.br

^b Professora Orientadora, Doutora, christiane.trindade@ufms.br

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

RESUMO

A madeira é amplamente utilizada na construção civil e, como material estrutural, deve ser analisada a fim de garantir a segurança dos usuários. A verificação das peças de madeira é normatizada pela NBR 7190 Projetos de Estruturas de Madeira, que após mais de duas décadas sem atualizações, foi revisada e trouxe uma nova forma de analisar as peças submetidas à compressão e flexo-compressão. Neste trabalho foram analisadas as diferenças ocorridas entre as duas versões da norma, NBR 7190 (ABNT, 1997) e NBR 7190-1 (ABNT, 2022), para madeiras serradas da classe das dicotiledôneas. O método visou estabelecer uma seção e carregamento para cada caso, compressão simples e flexo-compressão, variando o comprimento da barra. Os cálculos e gráficos foram feitos com o auxílio do software Microsoft Excel. Os resultados mostram que a mudança na expressão de verificação impactou nos resultados dos coeficientes de aprovação, permitindo a curva contínua sem descontinuidades. A mudança no módulo de elasticidade tornou a norma de 2022 mais rigorosa e a remoção do k_{mod3} modificou o início da curva para pequenas esbeltezes. Ademais, foi verificado que a norma de 2022, não mais classifica as barras conforme o índice de esbeltez, simplificou o processo de dimensionamento para peças comprimidas e flexo-comprimidas e está mais rigorosa quanto às verificações. Portanto, a norma de NBR 7190-1 (ABNT, 2022) possui processo mais eficiente e de menor complexidade que facilita sua aplicação.

Palavras-chave: madeira, verificação, compressão, flexo-compressão.

ABSTRACT

Wood is widely used in civil construction, and as a structural material, it must be analyzed to ensure user safety. The verification of wooden components is standardized by NBR 7190 Wood Structures Design Code, which, after more than two decades without updates, was revised and introduced a new way of analyzing components subjected to compression and combined bending and compression. This study analyzed the differences between the two versions of the standard, NBR 7190 (ABNT, 1997) and NBR 7190-1 (ABNT, 2022), for sawn woods of the dicotyledonous class. The method aimed to establish a section and loading for each case: simple compression and combined bending and compression, varying the bar length. Calculations and graphs were performed using Microsoft Excel software. The results show that the change in verification criteria impacted the acceptance coefficients, allowing for a continuous curve without discontinuities. The adjustment in the modulus of elasticity made the 2022 standard more stringent, and the removal of k_{mod3} altered the beginning of the curve for small slenderness ratios. Furthermore, it was found that the 2022 standard no longer classifies bars according to slenderness ratio, simplifying the design process for compressed and combined bending and compression pieces and imposing stricter verification checks. Therefore, the NBR 7190-1 (ABNT, 2022) standard offers a more efficient and less complex process that facilitates its application.

Keywords: wood, verification, compression, combined bending and compression.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material natural, renovável, com extração e processamento de baixo impacto. Possui boa resistência mecânica, capaz de resistir tanto à tração quanto à compressão e baixa densidade que

torna seu uso amplo na construção civil. (PFEIL, (2003); DIAS *et al*, (2019)).

No Brasil, a norma brasileira que trata do projeto e execução de estruturas de madeira é a NBR 7190 (ABNT) Projetos de Estruturas de Madeira, que visa estabelecer métodos de ensaio e de dimensionamento. Em 2022 foi publicado a reformulação da normativa,

a qual produziu grande mudanças no modo de verificação de barras submetidas a compressão e flexo-compressão. A nova formulação modificou o sistema de classificação da esbeltez das barras e simplificou o processo de verificação da estabilidade das peças. Outra mudança importante foi a alteração no módulo elasticidade, propriedade esta fundamental na resistência das barras comprimidas.

Tendo em vista as mudanças ocorridas na verificação de peças comprimidas da norma NBR 7190 (ABNT), de Projetos de Estruturas de Madeira, o presente trabalho tem por objetivo fazer um comparativo entre as duas versões, publicadas em 1997 e 2022, a fim quantificar os impactos das mudanças na verificação da estabilidade de barras comprimidas e flexo-comprimidas.

2. VERIFICAÇÃO DE PEÇAS SEGUNDO NBR 7190 (ABNT, 1997) E NBR 7190-1 (ABNT, 2022)

2.1. Dimensionamento e verificação de peças submetidas à compressão e flexo-compressão de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997)

2.1.1. Dimensionamento de peças submetidas à compressão simples

As peças submetidas à compressão são dimensionadas admitindo-se uma excentricidade acidental do esforço de compressão. Essa excentricidade advém das imperfeições geométricas das peças e inevitáveis excentricidades que ocorrem na montagem das estruturas, efeitos de segunda ordem e fluência da madeira NBR 7190 (ABNT, 1997).

O dimensionamento das barras depende do seu índice de esbeltez dado pela Equação (1).

$$\lambda = \frac{L_0}{i_{\min}} \quad (1)$$

Sendo:

L_0 é o comprimento de flambagem da peça;

i_{\min} é o raio de giração mínimo da seção transversal da peça;

O comprimento de flambagem é determinado de acordo com as condições de contorno da peça. Para barras com ambas extremidades indeslocáveis por flexão o comprimento mínimo é de $L_0 = L$. Para barras com uma extremidade engastada e outra livre, $L_0 = 2L$.

O raio de giração é determinado de acordo com Equação (2).

$$i_{\min} = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2)$$

Sendo:

I é o momento de inércia;

A é a área da seção transversal.

De acordo com os cálculos do dimensionamento, temos a classificação feita de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1- Classificação das peças comprimidas.

Barras Curtas	$\lambda \leq 40$
Barras medianamente esbeltas	$40 < \lambda \leq 80$
Barras esbeltas	$80 < \lambda \leq 140$

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

2.1.2. Verificação de peças submetidas à compressão simples

2.1.2.1. Barras curtas

As barras curtas são aquelas com esbeltez $\lambda \leq 40$ e a verificação segue a condição dada pela Equação (3).

$$\sigma_{c,d} \leq f_{c0d} \quad (3)$$

Sendo:

σ_{c0d} é a razão entre força aplicada N_d e área da seção transversal [MPa];

f_{c0d} é a resistência à compressão paralela às fibras de cálculo [MPa].

$$\sigma_{c0d} = \frac{N_d}{A} \quad (4)$$

$$f_{c0d} = k_{mod} \frac{f_{c0,k}}{\gamma_w} \quad (5)$$

Sendo:

k_{mod} é o coeficiente de modificação;

$f_{c0,k}$ é a resistência característica [MPa];

γ_w é o coeficiente de minoração das propriedades da madeira, de valor 1,4 para compressão.

O k_{mod} , coeficiente de modificação, é obtido de acordo com a duração do carregamento da estrutura, umidade relativa do ambiente e classificação da madeira, dado por:

$$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3} \quad (6)$$

Sendo:

k_{mod1} é o coeficiente de modificação de acordo com o tipo de carregamento e a madeira utilizada;
 k_{mod2} é o coeficiente de modificação de acordo com a umidade relativa do ambiente;
 k_{mod3} é o coeficiente de modificação com valor de 0,8 para madeiras de 2ª categoria e 1,0 para madeiras de 1ª categoria, conforme NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 1 - Valores de k_{mod1} .

Classes de carregamento	Tipos de madeira	
	Madeira serrada Madeira laminada colada Madeira compensada	Madeira recomposta
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,85	0,65
Curta duração	1,00	1,00
Instantânea	1,10	1,10

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 2 - Valores de k_{mod2} .

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

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

2.1.2.2. Barras medianamente esbeltas

As flambagem decorrente da compressão gera deslocamentos laterais. Entretanto, existe uma carga crítica para que esse fenômeno comece a ocorrer, a carga, a carga crítica de Euler.

$$F_E = \frac{\pi^2 \cdot E_{c0,ef} \cdot I}{L_0} \quad (7)$$

Sendo:

I é o momento de inércia da seção transversal da peça relativo ao plano de flexão em que se está verificando a condição de segurança;

$E_{c0,ef}$ é o módulo de elasticidade paralelamente às fibras deve ser tomado com o valor efetivo [MPa].

$$E_{c0,ef} = k_{mod} \cdot E_{c0,m} \quad (8)$$

$E_{c0,m}$ é o valor médio dos módulos de elasticidade à compressão e à tração paralelas às fibras, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3- Classes de resistência das dicotiledôneas.

Classes de resistência das dicotiledôneas					
Classes	f_{c0k} (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ kg/m ³	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
C 20	20	4	9500	500	650
C 30	30	5	14500	650	800
C 40	40	6	19500	750	950
C 60	60	8	24500	800	1000

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

Ademais, esforços de compressão provocam o aparecimento de excentricidades acidentais, que segundo a norma de 1997, ocorrem “em virtude das imperfeições geométricas das peças e das excentricidades inevitáveis dos carregamentos, levando-se ainda em conta os acréscimos destas excentricidades em decorrência dos efeitos de segunda ordem e, nas peças esbeltas, da fluência da madeira.”

O deslocamento total é determinado, conforme descrito por TIMOSHENKO & GERE (1984), pela Equação (9):

$$e_d = e_1 \left(\frac{F_E}{F_E - N_d} \right) \quad (9)$$

A excentricidade e_1 é calculada pela Expressão (10).

$$e_1 = e_a \quad (10)$$

Sendo:

e_a é a excentricidade acidental mínima (Equação (11)), não se tomando valor menor que $\frac{h}{30}$.

$$e_a = \frac{L_0}{300} \quad (11)$$

O deslocamento associado ao esforço de compressão, gera momentos fletores nas barras. O momento fletor de segunda ordem M_d , é calculado pela Equação (12).

$$M_d = N_d \cdot e_d \quad (12)$$

A verificação da condição de segurança relativa ao estado limite último de instabilidade, no ponto mais comprimido da seção transversal segue a condição dada pela Expressão (13).

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cod}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cod}} \leq 1 \quad (13)$$

2.1.2.3. Barras esbeltas

A excentricidade para barras esbeltas é denominada de excentricidade efetiva de primeira ordem $e_{1,ef}$, e é calculada pela Equação (14).

$$e_{1,ef} = e_1 + e_c = e_a + e_c \quad (14)$$

A excentricidade, e_c é a excentricidade suplementar de primeira ordem que representa a fluência da madeira.

$$e_c = (e_a) \left\{ e^{\left[\frac{\phi [N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}]}{F_E - [N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}]} \right]} - 1 \right\} \quad (15)$$

Sendo:

ϕ é o coeficiente de fluência de acordo com as classes de umidade;

ψ_1 e ψ_2 são valores dos fatores de redução para as ações variáveis;

N_{gk} e N_{qk} são os valores característicos da força normal devido as cargas permanentes e variáveis, respectivamente.

Tabela 4 - Coeficiente ϕ .

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

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

O momento fletor gerado é calculado pela Expressão (16).

$$M_d = N_d \cdot e_{1,ef} \left(\frac{F_E}{F_E - N_d} \right) \quad (16)$$

Sendo:

e_c é uma excentricidade suplementar de primeira ordem que representa a fluência da madeira.

A verificação das barras esbeltas segue a mesma condição da Equação (13).

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cod}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cod}} \leq 1 \quad (13)$$

2.1.3. Verificação de peças submetidas à flexo-compressão

Na flexo-compressão surgem os momentos de primeira ordem decorrentes das combinações de momento e precisam ser incluídos nas verificações.

2.1.3.1. Barras curtas

As barras curtas são verificadas quando atendida à condição de segurança no ELU

$$\left(\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cod}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cod}} \leq 1 \quad (17)$$

2.1.3.2. Barras medianamente esbeltas

Nas barras medianamente esbeltas ocorre a inclusão das excentricidades decorrentes do momento de primeira ordem, logo e_1 assume o valor calculado em (18).

$$e_1 = e_i + e_a \quad (18)$$

Sendo:

e_i é a excentricidade de primeira ordem decorrente da situação de projeto.

$$e_i = \frac{M_{1d}}{N_d} \quad (19)$$

M_{1d} é o valor de cálculo do momento fletor na situação de projeto devido às ações permanentes e variáveis;

N_d é a força de compressão na situação de projeto devido às ações permanentes e variáveis.

Logo,

$$e_d = (e_i + e_a) \left(\frac{F_E}{F_E - N_d} \right) \quad (20)$$

$$M_d = N_d \cdot (e_i + e_a) \left(\frac{F_E}{F_E - N_d} \right) \quad (21)$$

A condição de segurança para barras medianamente esbeltas submetidas à flexo-compressão é a mesma para barras medianamente esbeltas (Equação (13)).

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cod}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cod}} \leq 1 \quad (13)$$

2.1.3.3. Barras esbeltas

A excentricidade efetiva de primeira ordem, $e_{1,ef}$, para o caso da flexo-compressão, passa a receber a influência dos momentos fletores de primeira ordem, calculada ela Equação (22)

$$e_{1,ef} = e_1 + e_c = e_i + e_a + e_c \quad (22)$$

Com e_c , calculado em (23):

$$e_c = (e_{ig} + e_a) \left\{ e^{\left[\frac{\phi [N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}]}{E E - [N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}]} \right]} - 1 \right\} \quad (23)$$

Em que:

e_{ig} é a excentricidade inicial devidos cargas permanentes calculada pela Expressão (24).

$$e_{ig} = \frac{M_{1g,d}}{N_{gd}} \quad (24)$$

Sendo:

$M_{1g,d}$ é o valor de cálculo do momento fletor devido apenas às ações permanentes;

N_{gd} é o valor de cálculo da compressão devido às ações permanentes.

A condição de segurança é atendida quando verificada a Equação (13).

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cod}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cod}} \leq 1 \quad (13)$$

2.2. Dimensionamento e verificação de peças submetidas à compressão e flexo-compressão de acordo com a NBR 7190-1 (ABNT, 2022)

2.2.1. Barras submetidas a compressão simples

As barras são verificadas de acordo com esbeltez relativa, λ_{rel} , de acordo com as condições abaixo.

$$\lambda_{rel} < 0,3$$

Verificada por:

$$\sigma_{Nc,d} \leq f_{cod} \quad (25)$$

Caso a esbeltez relativa seja maior ou igual que 0,3, são verificadas conforme a Equação (26).

$$\lambda_{rel} \geq 0,3$$

$$\begin{cases} \sigma_{Nc,d} \leq k_{cx} f_{cod} \\ \sigma_{Nc,d} \leq k_{cy} f_{cod} \end{cases} \quad (26)$$

O cálculo de λ_{rel} é feito por meio das direções x e y:

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

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (28)$$

Sendo:

$E_{0,05}$ é o módulo de elasticidade na direção paralela às fibras, obtido diretamente na Tabela 3 da norma ou calculada conforme a Equação (29).

$$E_{0,05} = 0,7 \cdot E_{c0,med} \quad (29)$$

$\sigma_{Nc,d}$ é a tensão atuante em decorrência da força de compressão na seção transversal da barra.

$$\sigma_{cod} = \frac{N_{c,d}}{A} \quad (30)$$

Os coeficientes, k_{cx} e k_{cy} são calculados por:

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}} \quad (31)$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}} \quad (32)$$

Sendo:

$$k_x = 0,5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2 \right] \quad (33)$$

$$k_y = 0,5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2 \right] \quad (34)$$

O fator para peças estruturais, β_c , assume os seguintes valores:

a) Para madeira maciça serrada e peças roliças: $\beta_c = 0,2$;

b) Para madeira lamelada (MLC e MLCC) e madeira laminada (LVL): $\beta_c = 0,1$.

2.2.2. Barras submetidas a flexão-composta

A verificação de barras com $\lambda_{rel} < 0,3$, segue a condição abaixo:

$$\left(\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cod}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Md}}{f_{md}} \leq 1 \quad (35)$$

Sendo:

σ_{cod} é a razão entre força aplicada N_d e área da seção transversal A . [MPa];

f_{cod} é a resistência à compressão paralela às fibras de cálculo [MPa];

f_{md} é o valor de cálculo da resistência à flexão. No Quadro 1.3 da norma, a resistência à flexão é dada por f_{bk} . Se considerar a Tabela 2 da norma, usar $f_{md} = f_{cod}$.

A resistência à compressão segundo a norma de 2022, segue:

$$f_{cod} = k_{mod} \frac{f_{c0,k}}{\gamma_w} \quad (36)$$

Sendo:

k_{mod} é o coeficiente de modificação;

$f_{c0,k}$ é a resistência característica [MPa];

γ_w é o coeficiente de minoração das propriedades da madeira, de valor 1,4 para compressão.

O k_{mod} , coeficiente de modificação, é obtido de acordo com a duração do carregamento da estrutura, umidade relativa do ambiente e classificação da madeira, dado por:

$$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \quad (37)$$

Sendo:

k_{mod1} é coeficiente de modificação de acordo com o tipo de carregamento e a madeira utilizada;

k_{mod2} é coeficiente de modificação de acordo com a umidade relativa do ambiente.

A resistência característica para a versão de 2022, pode ser verificada na Tabela 5.

Tabela 5 - Classes de resistência das dicotiledôneas.

Classes	f_{c0k} (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	Densidade a 12% kg/m ³
D 20	20	4	10.000	500
D 30	30	5	12.000	625
D 40	40	6	14.500	750
D 50	50	7	16.500	850
D 60	60	8	19.500	1000

Fonte: NBR 7190-1 (ABNT, 2022).

Tabela 6 - Valores de k_{mod2}

Classes de umidade	Madeira serrada Madeira laminada colada Madeira compensada	Madeira recomposta
(1)	1,0	1,0
(2)	0,9	0,95
(3)	0,8	0,93
(4)	0,7	0,9

Fonte: NBR 7190-1 (ABNT, 2022).

A verificação para peças cuja esbelteza relativa seja $\lambda_{rel} \geq 0,3$, seguem a verificação de acordo com os momentos aplicados e as considerações da norma.

Sejam os esforços de compressão e momento atuantes, N_d e M_{xd} a verificação ocorre pela condição dada pelas Equações (38) e (39):

$$\frac{\sigma_{Nd}}{k_{cx} \cdot f_{cod}} + \frac{\sigma_{Mxd}}{f_{md}} \leq 1 \quad (38)$$

$$\frac{\sigma_{Nd}}{k_{cy} \cdot f_{cod}} \leq 1 \quad (39)$$

Para N_d e M_{yd} :

$$\frac{\sigma_{Nd}}{k_{cx} \cdot f_{cod}} \leq 1 \quad (40)$$

$$\frac{\sigma_{Nd}}{k_{cy} \cdot f_{cod}} + \frac{\sigma_{Myd}}{f_{md}} \leq 1 \quad (41)$$

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado com base na norma de estruturas de madeiras NBR 7190 (ABNT, 1997) e NBR 7190-1 (ABNT, 2022). Primeiramente, foram analisadas as peças submetidas à compressão simples e flexão composta reta de acordo com a versão de 1997, levando em consideração a variação do índice de esbelteza em seus limites máximos e mínimos para cada classificação (curta, medianamente esbelta e esbelta), sem ultrapassar o valor máximo de 140. Em seguida, o mesmo procedimento foi feito para a norma de 2022, considerando os comprimentos empregados no processo anterior. Os cálculos foram feitos com auxílio do software Excel.

O trabalho foi realizado com todas as classes de resistência em corpos de prova isentos de defeitos das dicotiledôneas, com exceção da classe D 50, por ter sido incluída posteriormente. As condições de

contorno consideradas foram de rotação livre e translações impedidas em um dos vínculos e rotação e translação vertical livre com translação lateral impedida na outra extremidade, de modo que ambas as normas considerassem $K_E = 1,0$. O comprimento utilizado para análise variou a cada 10cm, partindo de 50cm até 400cm.

As seções utilizadas foram de 10x10cm para flexão simples e 15x10cm para flexo-compressão.

As condições de projeto para ambas as análises, incluíram, umidade relativa de 80% e carregamento de longa duração. A madeira utilizada foi a serrada.

Os esforços considerados estão expostos na Tabela 7 e Tabela 8, e foram determinados a partir das equações. O fator de combinação $\gamma_g = 1,4$.

$$M_d = \gamma_g \cdot M_{gk} + \gamma_q \cdot M_{qk} \quad (42)$$

Sendo:

M_d é o momento de projeto;

γ_g é o fator de combinação;

M_{gk} é o momento característico decorrente da carga permanente;

M_{qk} é o momento característico decorrente da carga acidental.

$$N_d = \gamma_g \cdot N_{gk} + \gamma_q \cdot N_{qk} \quad (43)$$

Sendo:

N_{gk} é o esforço de compressão característico decorrente da carga permanente;

N_{qk} é o esforço de compressão característico decorrente da carga acidental;

N_d é o esforço de compressão.

Tabela 7 - Esforços para análise da compressão simples.

Análise compressão simples				
γ_g	γ_q	$N_{gk}(kN)$	$N_{qk}(kN)$	$N_d(kN)$
1,4	1,4	8	3	15,4

Fonte: autora.

Tabela 8 - Esforços para análise da flexo-compressão.

Análise flexo-compressão				
γ_g	γ_q	$M_{gk}(kNm)$	$M_{qk}(kNm)$	$M_d(kNm)$
1,4	1,4	0,3	0,2	0,7
γ_g	γ_q	$N_{gk}(kN)$	$N_{qk}(kN)$	$N_d(kN)$
1,4	1,4	20	10	42

Fonte: autora.

O índice considerado para avaliar e comparar as duas versões da norma foi denominado coeficiente de aprovação, e é o resultado da condição de segurança

adequada para cada tipo de esforço ou classificação de esbeltez, conforme mostrado na Tabela 9 e Tabela 10. O coeficiente inferior a 1,0 significa que a condição de segurança está satisfeita, e índices maiores que 1,0 significam que a barra não atende à condição de segurança.

Tabela 9 - Expressões para o cálculo do coeficiente de aprovação para compressão simples.

NBR 7190 (ABNT, 1997)	Nº equação
$\lambda \leq 40$	$\frac{\sigma_{cod}}{f_{cod}}$ (3)
$40 < \lambda \leq 80$	$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cod}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cod}}$ (13)
$80 < \lambda \leq 140$	$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cod}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cod}}$ (13)
NBR 7190-1 (ABNT, 2022)	
$\lambda_{rel} < 0,3$	$\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{cod}}$ (25)
$\lambda_{rel} \geq 0,3$	$\begin{cases} \frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cx} \cdot f_{cod}} \\ \frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cy} \cdot f_{cod}} \end{cases}$ (26)

Fonte: autora.

Tabela 10 - Expressões para o cálculo do coeficiente de aprovação para flexo-compressão

NBR 7190 (ABNT, 1997)	Nº equação
$\lambda \leq 40$	$\left(\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cod}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cod}}$ (17)
$40 < \lambda \leq 80$	$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cod}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cod}}$ (13)
$80 < \lambda \leq 140$	$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cod}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cod}}$ (13)
NBR 7190-1 (ABNT, 2022)	
$\lambda_{rel} < 0,3$	$\left(\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cod}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cod}}$ (35)
$\lambda_{rel} \geq 0,3$	$\frac{\sigma_{Nd}}{k_{cx} \cdot f_{cod}} + \frac{\sigma_{Mxd}}{f_{md}}$ (38)

Fonte: autora.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Compressão simples

A curva de aprovação gerada para a classe D 20 /C 20 obteve comportamento horizontal parecido, diferenciando-se por conta do valor de k_{mod3} , utilizado na determinação de f_{cod} , que contribuiu para pequeno acréscimo no coeficiente de aprovação. Fazendo a relação entre os k_{mod} de 1997 e 2022, temos:

$$\frac{k_{mod,22}}{k_{mod,97}} = \frac{k_{mod1} \cdot k_{mod2}}{k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3}}$$

$$\frac{k_{mod,22}}{k_{mod,97}} = \frac{0,7 \cdot 0,8}{0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,8} = 1,25$$

Isto representou aumento de 25% nos coeficientes de aprovação da NBR 7190 (ABNT, 1997) para esbeltezes correspondentes a esbeltez relativa. Como verificado entre o trecho 30-40 no eixo da esbeltez a curva NBR 7190-1 (ABNT, 2022) começa a crescer,

verificando a observação feita. Essa ocorrência pode ser verificada em todas as demais classes, no Gráficos 2, 3, e 4, uma vez que o coeficiente k_c para o início das curvas, tanto na norma 1997, quanto de 2022, são iguais a 1,0, alterando-se apenas o k_{mod} .

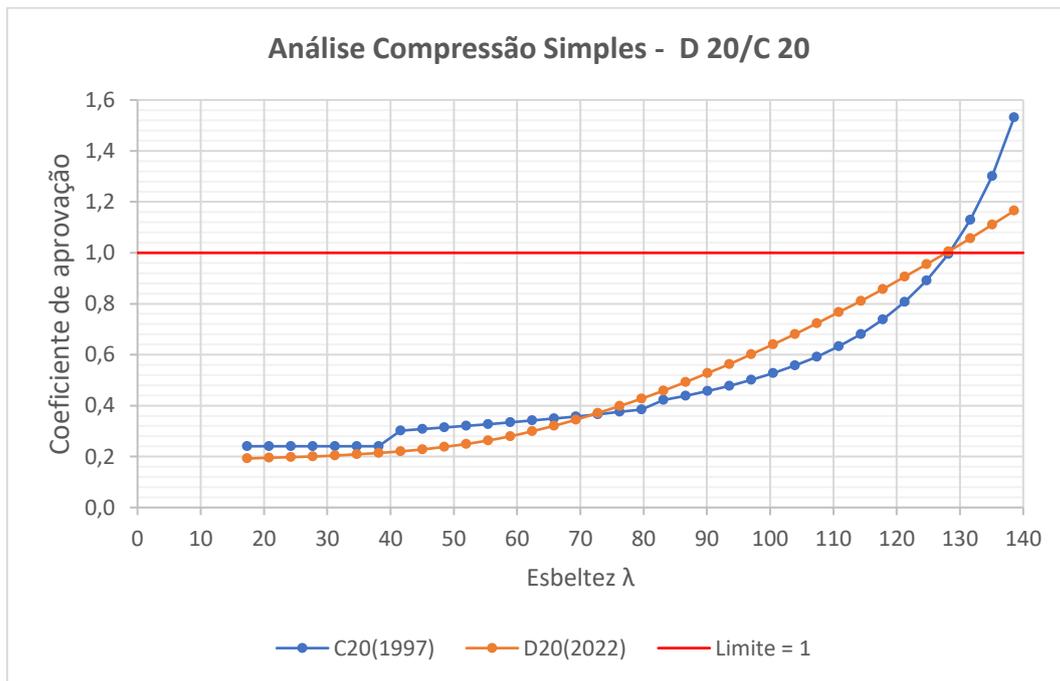
As considerações do k_{mod} . Foram tomadas conforma exposto na Tabela 11.

Tabela 11 - Considerações para os coeficientes de modificação de acordo com cada norma.

Norma	k_{mod1}	k_{mod2}	k_{mod3}
Consideração	Longa duração	Classe 3 de umidade	Madeira Serrada
NBR 7190 (ABNT, 1997).	0,7	0,8	0,8
NBR 7190-1 (ABNT, 2022).	0,7	0,8	-

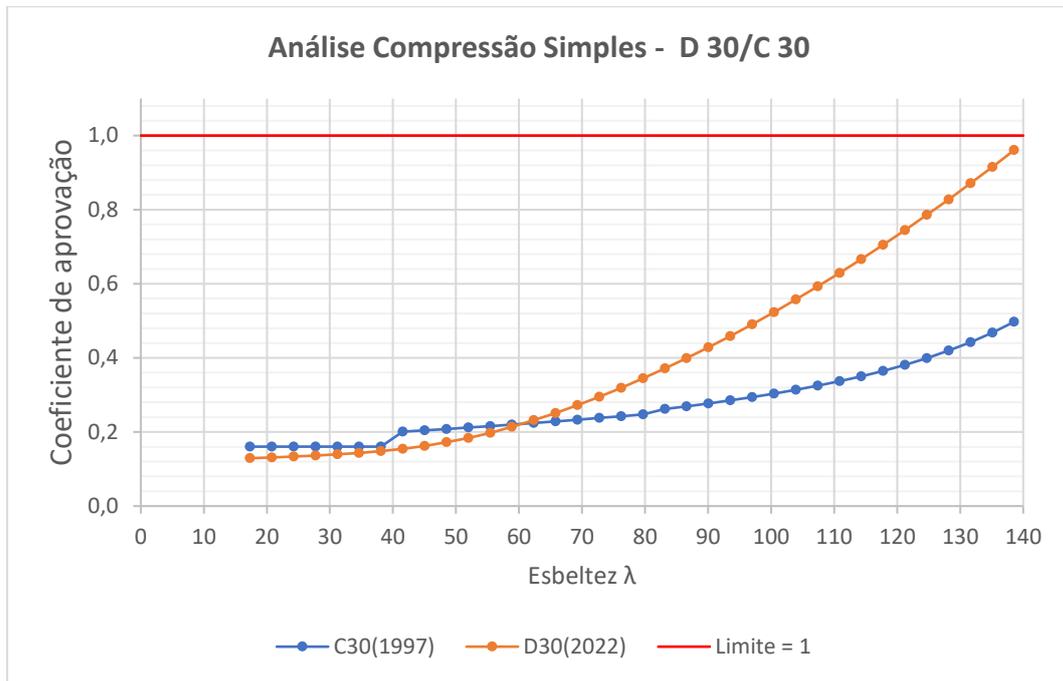
Fonte: autora.

Gráfico 1 - Análise comparativa dos coeficientes de aprovação para classe C 20 e D 20, para barras submetidas a compressão simples.



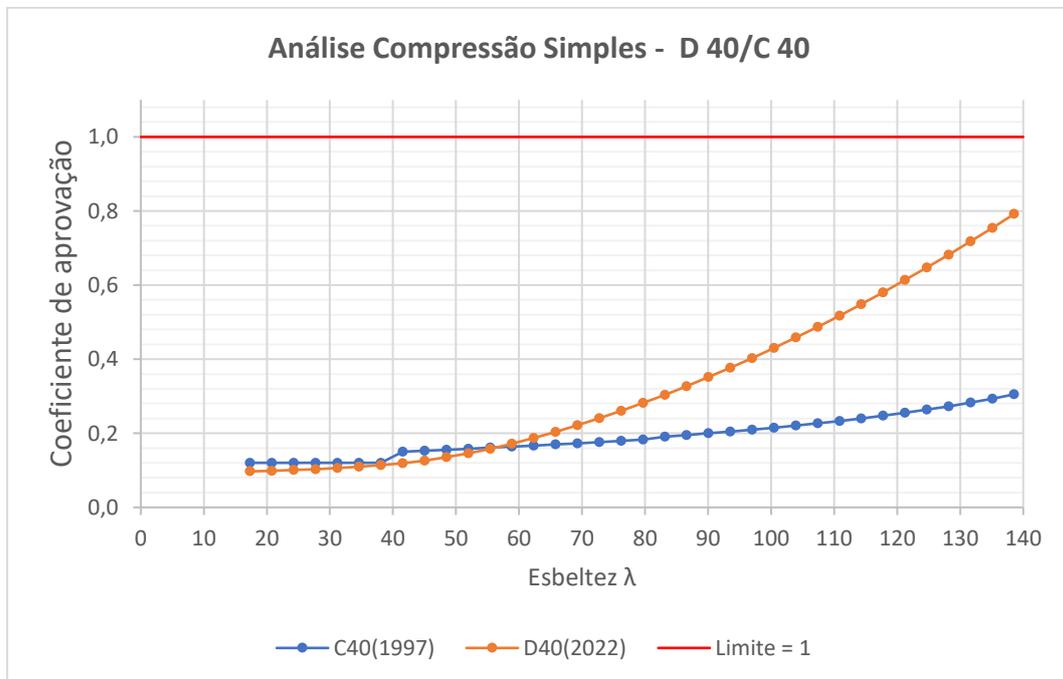
Fonte: autora.

Gráfico 2 - Análise comparativa dos coeficientes de aprovação para classe C 30 e D 30, para barras submetidas a compressão simples.



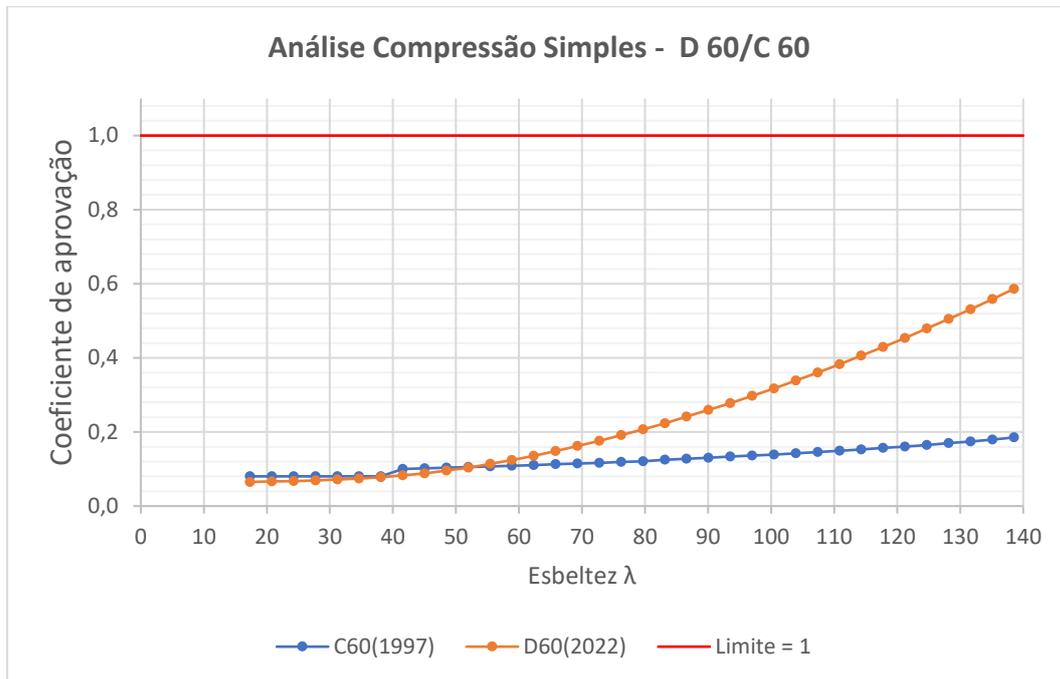
Fonte: autora.

Gráfico 3 - Análise comparativa dos coeficientes de aprovação para classe C 40 e D 40, para barras submetidas a compressão simples.



Fonte: autora.

Gráfico 4 - Análise comparativa dos coeficientes de aprovação para classe C 60 e D 60, para barras submetidas a compressão simples.



Fonte: autora.

Analisando o Gráfico 2, podemos perceber que a curva da NBR 7190-1 (ABNT, 2022) obteve valores maiores para os coeficientes de aprovação. O mesmo comportamento pode ser verificado nas demais classes, analisadas no Gráfico 3 e Gráfico 4. A hipótese inicial para tal comportamento estaria relacionada com a mudança dos módulos de elasticidade.

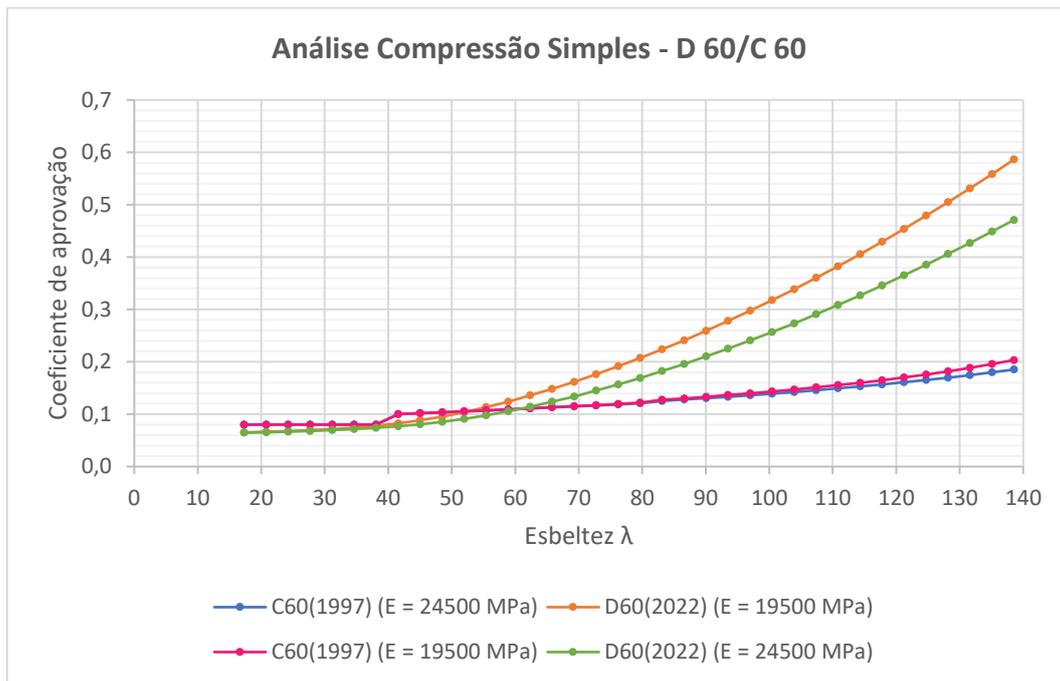
Para fins de comparação em relação ao impacto do módulo de elasticidade, foi realizada troca entre os módulos. Adotou-se para a classe C 60 $E_{c0,m} = 19500 \text{ MPa}$ e para D 60 $E_{c0,med} = 24500 \text{ MPa}$. As curvas geradas podem ser visualizadas no Gráfico 5. Percebe-se que a alteração do módulo para a norma de 1997 não gerou mudanças significativas. Para a curva

da norma de 2022 o impacto foi maior para o coeficiente de aprovação, principalmente para esbeltezes maiores.

A mudança no módulo de elasticidade pode ser observada da mesma forma para barras submetidas à flexo-compressão no Gráfico 6.

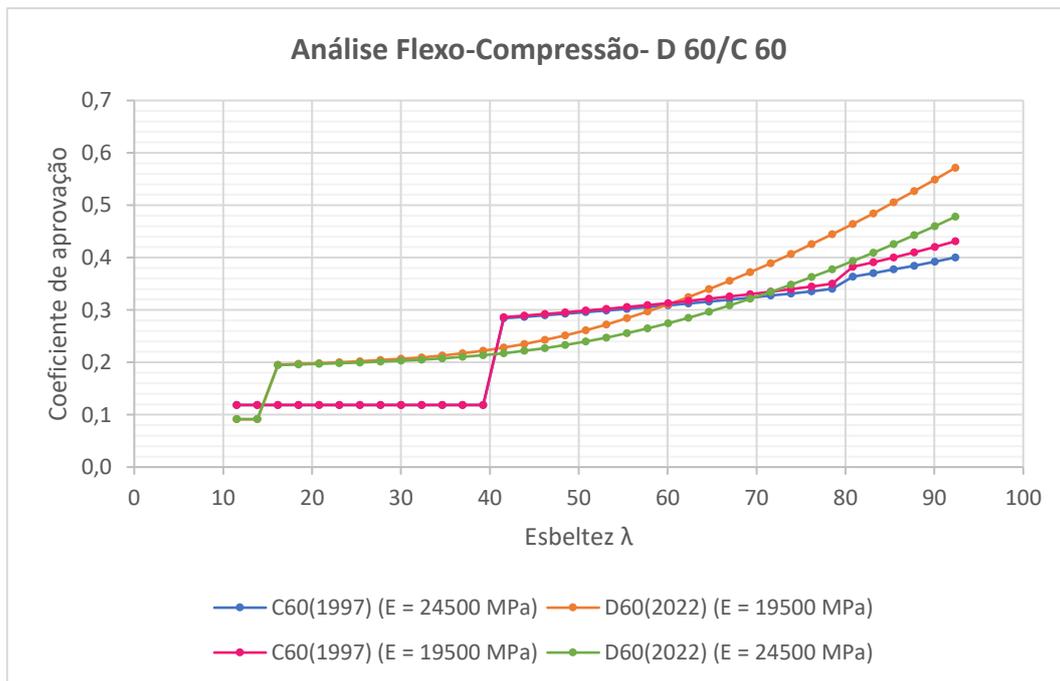
O aumento do coeficiente de aprovação na revisão de 2022 ocorreu em decorrência da mudança da expressão entre as duas normas e não em função da redução dos módulos de elasticidade. Caso a norma mantivesse os mesmos módulos de elasticidade, haveria mudanças significativas na curva de 2022, entretanto, não foi este o fator fundamental na variação da curva.

Gráfico 5 - Comparação entre as normas e módulos de elasticidade para a compressão simples.



Fonte: autora.

Gráfico 6 - Comparação entre as normas e módulos de elasticidade para a flexo-compressão.



Fonte: autora.

4.2. Resultados para flexo-compressão

Os gráficos obtidos para a flexo-compressão calculados com a norma de 1997, apresentaram descontinuidades maiores do que na compressão simples. O momento de primeira ordem, favoreceu o aumento das excentricidades mínimas, de primeira ordem, de segunda ordem e da fluência da madeira,

gerando coeficientes maiores para a antiga norma nos intervalos de esbelteza.

As lacunas observadas nos diagramas da NBR 7190-1 (ABNT, 1997) não favorecem a economia, pois um pequeno acréscimo no comprimento da barra, pode gerar coeficiente de aprovação maior do que 1,0, devendo-se aumentar a seção.

As discontinuidades ocorrem na passagem de curtas para medianamente esbeltas e de medianamente esbeltas para esbeltas, como vistas nos gráficos. Isto ocorre devido as considerações das excentricidades, que para as medianamente esbeltas ocorre apenas excentricidade accidental no caso da compressão e excentricidade accidental junto com excentricidade de primeira ordem na flexo-compressão. As peças esbeltas possuem a adição da excentricidade accidental, excentricidade de primeira ordem e excentricidade devido a fluência da madeira.

Além disso, a NBR 7190-1 (ABNT, 1997) apenas inclui efeitos de fluência da madeira, a partir da introdução do coeficiente no exponencial do cálculo da excentricidade de peças esbeltas.

É valido salientar que a fluência é mais significativa em peças de comprimento maior, como pode ser visualizado para os trechos de maior esbeltez. Todavia, a umidade é uma variável importante na situação real, capaz de gerar uma fluência significativa em peças curtas e medianamente

esbeltas, mas que não são consideradas pela norma de 1997.

Segundo Gehri (2000), o EUROCODE 5/1993, no qual foi baseado a norma NBR 7190-1 (ABNT, 2022), incluía valores de excentricidades e fluência e não fazia distinção das peças em relação a esbeltez.

Portanto, para a versão de 2022, não há considerações diretas de excentricidades no cálculo dos momentos de segunda ordem e a curva passa a ser a mesma para todos os comprimentos a partir da esbeltez relativa.

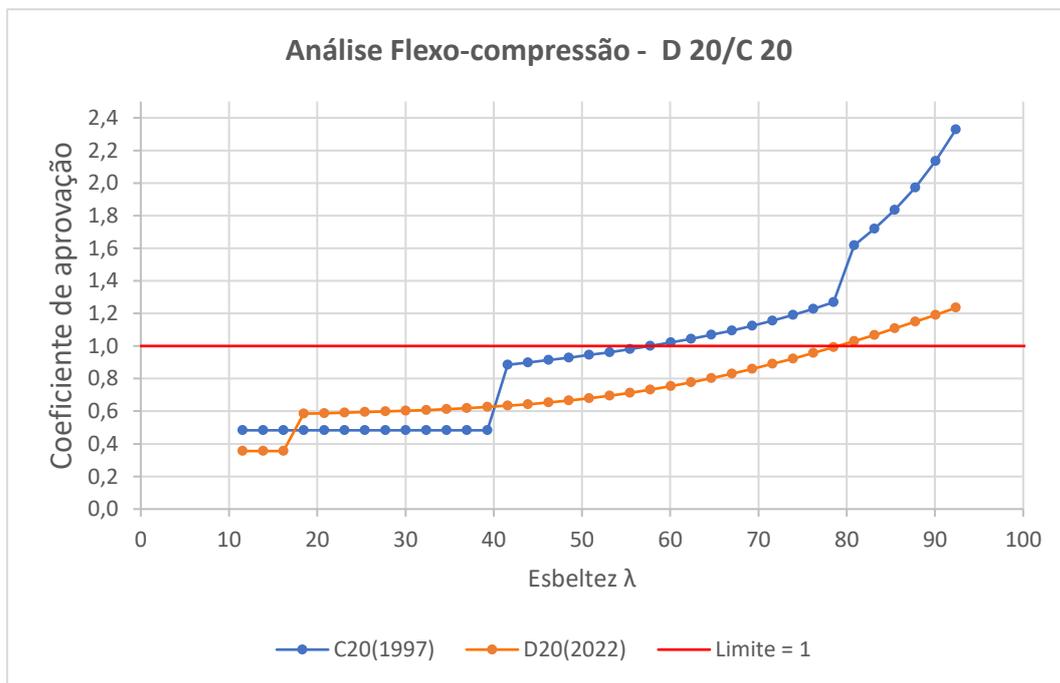
O item 6.5.2. da NBR 7190-1 (ABNT, 2022) passa a apenas limitar a o desalinhamento (equivalente a excentricidade accidental) em:

- a) L/300 para peças de madeira serrada ou roliça;
- b) L/500 para peças de madeira laminada colada.

A discontinuidade do diagrama é visivelmente notada nos gráficos apresentados e resumidos no

Gráfico 11.

Gráfico 7 - Análise comparativa dos coeficientes de aprovação para classe C 20 e D 20, para barras submetidas a flexo-compressão.

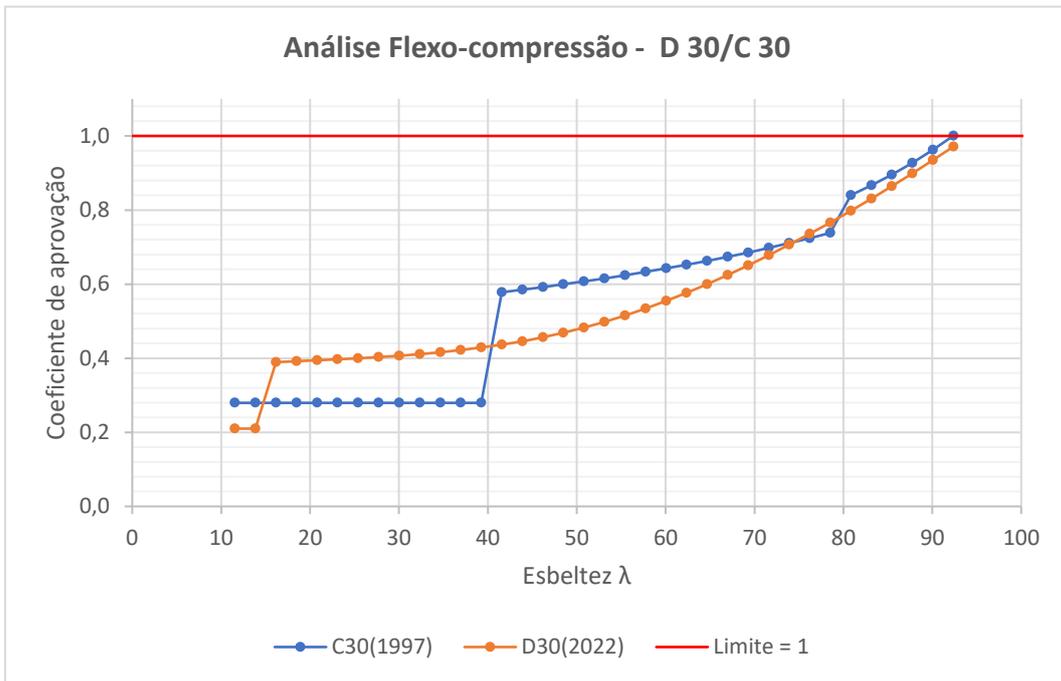


Fonte: autora.

A presença do exponencial da norma contribui significativamente para o aumento do coeficiente de aprovação. Observa-se que a curva do trecho das barras medianamente esbeltas possui inclinação mais suave. O trecho das barras esbeltas, sofre um acréscimo grande devido a presença do momento de

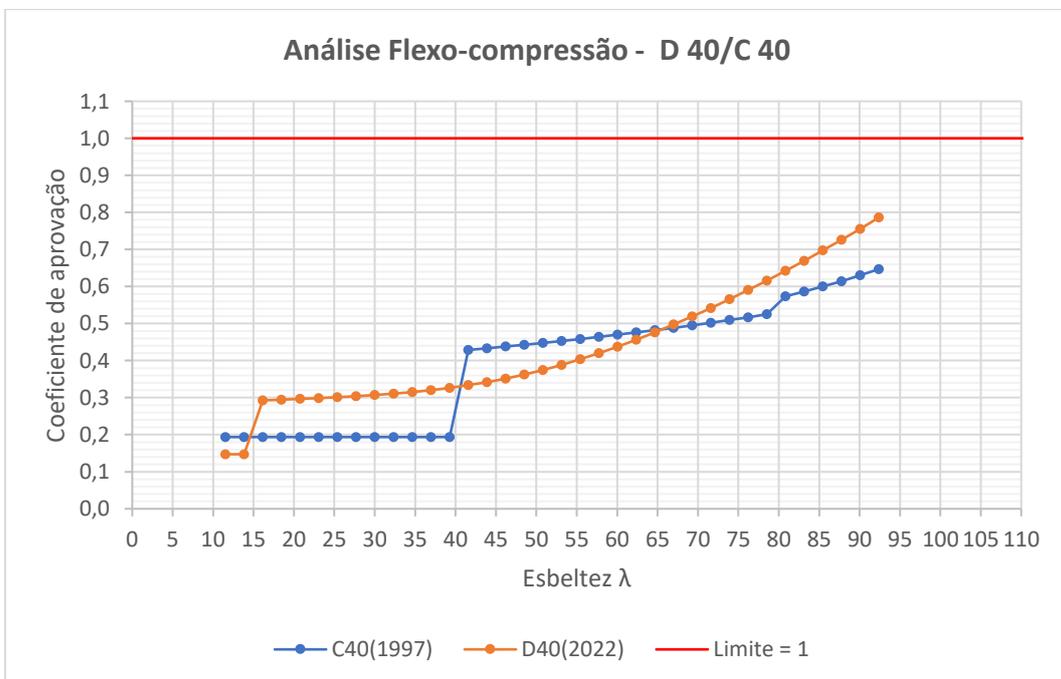
primeira ordem das cargas permanentes e também devido a fluência considerada apenas nessa classificação.

Gráfico 8 - Análise comparativa dos coeficientes de aprovação para classe C30/97 e D30/22, para barras submetidas a flexo-compressão.



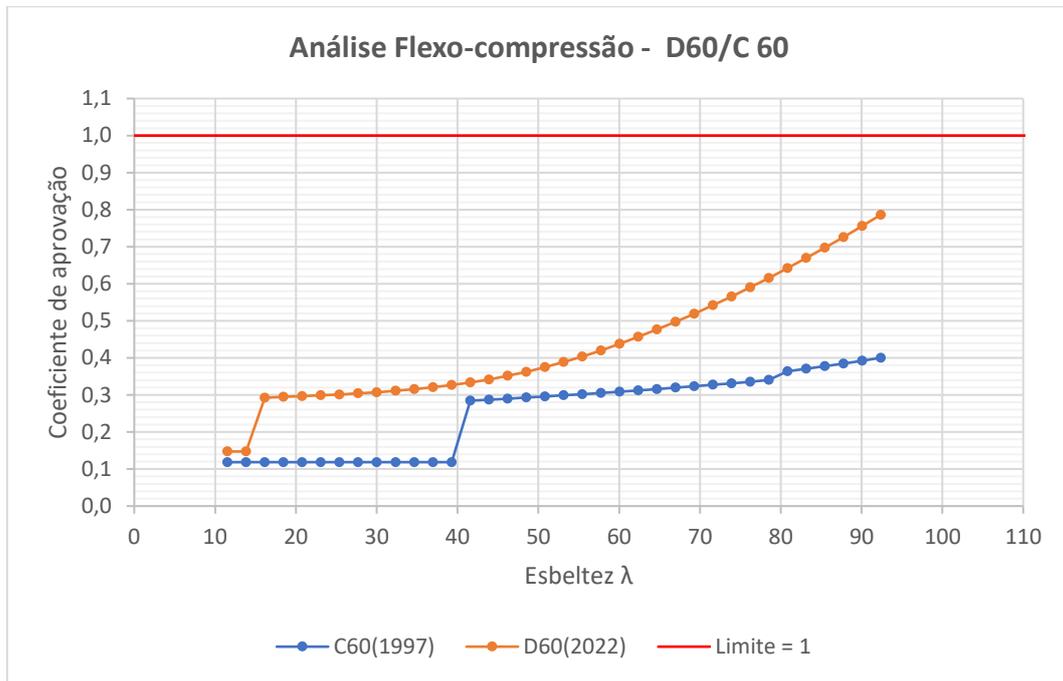
Fonte: autora.

Gráfico 9 - Análise comparativa dos coeficientes de aprovação para classe C 40e D 40, para barras submetidas a flexo-compressão.



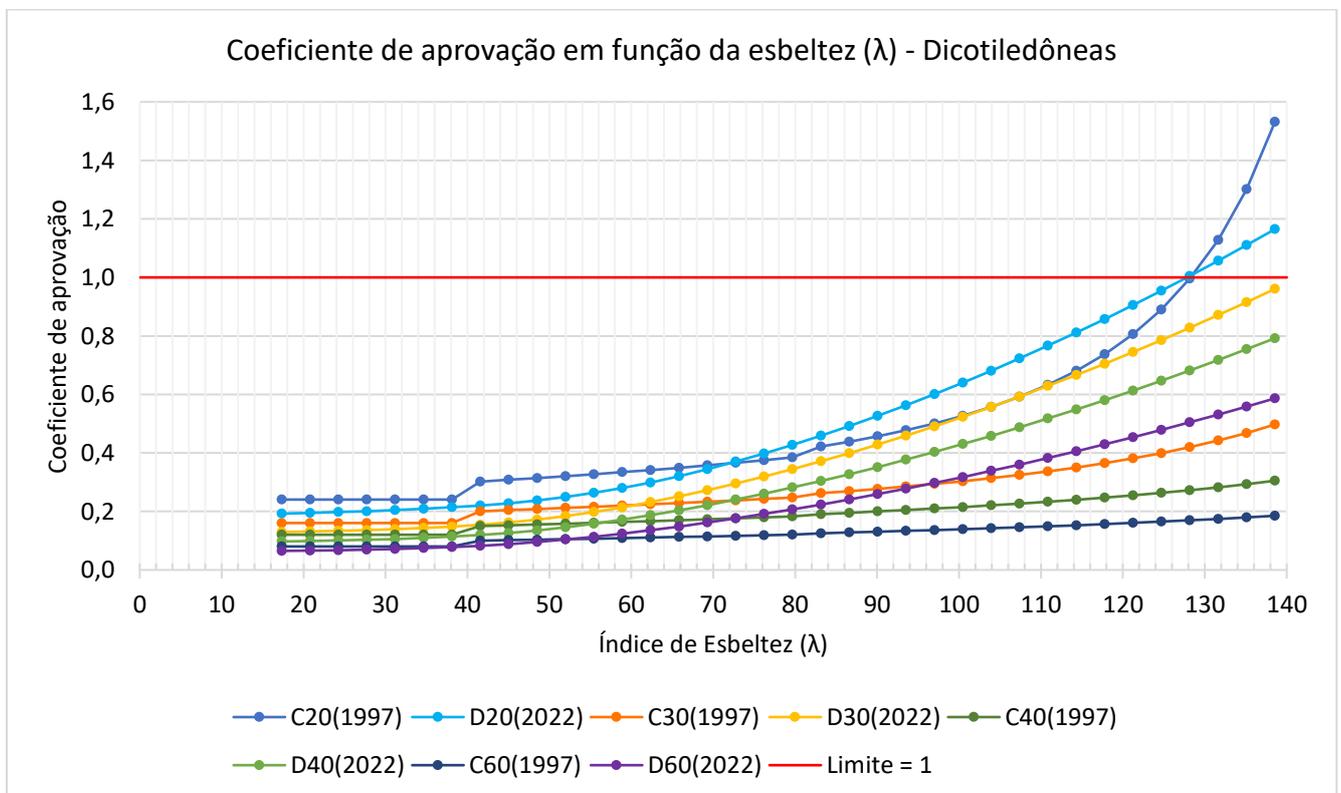
Fonte: autora.

Gráfico 10 - Análise comparativa dos coeficientes de aprovação para classe C 60 e D 60, para barras submetidas a flexo-compressão.



Fonte: autora.

Gráfico 11 - Coeficientes de aprovação em relação a esbelteza para peças simplesmente comprimidas.



Fonte: autora.

Os gráficos obtidos para a flexo-compressão possibilitam analisar melhor a influência da utilização da esbeltez relativa.

Repare que na equação da esbeltez relativa (retomada abaixo), a verificação irá ocorrer de acordo com duas grandezas características, a resistência característica da madeira e o módulo de elasticidade característico na direção paralela às fibras.

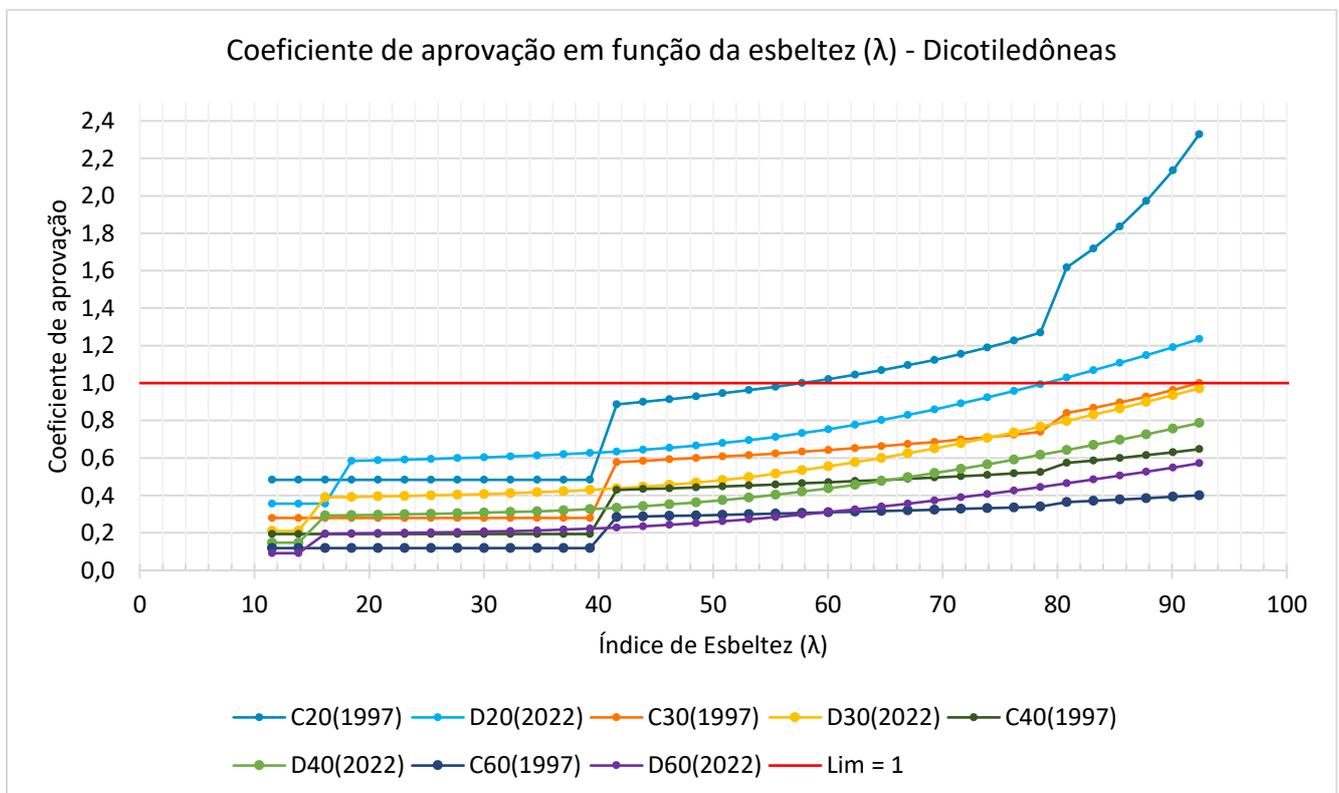
$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}}$$

Para fazer a comparação dos limites de cada norma, foi atribuído 0,3 de limite para a esbeltez relativa das classes de resistência de 2022 das dicotiledôneas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Os resultados para a esbeltez equivalente a esbeltez relativa de 0,3 podem ser verificados na Tabela 12.

$$0,3 = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}}$$

$$\lambda = \frac{0,3 \cdot \pi}{\sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}}}$$

Gráfico 12 - Coeficientes de aprovação em relação a esbeltez para peças flexo-comprimidas.



Fonte: autora.

Tabela 12 - Limites de esbeltez para as dicotiledôneas.

Classes	λ
D 20	17,63
D 30	15,77
D 40	15,01
D 50	14,32
D 60	14,22

Fonte: autora.

Verifica-se que o limite máximo para a nova norma para que fossem dispensadas verificações de estabilidade estaria entre a faixa de 14 a 17, o que para a norma de 1997 seriam consideradas barras curtas. Portanto, a norma atual apresenta-se mais rigorosa.

Essa observação pode ser visualizada no

Gráfico 11, no qual o trecho horizontal para NBR 7190-1 (ABNT, 1997) se estende a esbeltezes maior, enquanto que na NBR 7190-1 (ABNT, 2022) ele rapidamente é descontinuado e passa a valer a curva introduzida do k_c .

5. CONCLUSÃO

As mudanças ocorridas na norma 7190 Projetos de Estruturas de Madeira impactaram na forma de verificar estruturas comprimidas e flexo-comprimidas.

A consideração dos efeitos de segunda ordem advindas da introdução da esbelteza relativa e do fator k_c permitiu que a curva do coeficiente de aprovação fosse contínua, sem apresentar saltos. Essa mudança beneficia a segurança, pois passa a incluir fluência da madeira e as excentricidades para maior faixa de esbeltezes.

A modificação da expressão que determina a verificação gerou o impacto na curva, aumentando os coeficientes de aprovação. A revisão dos módulos de rigidez não foi a responsável pelas alterações nos coeficientes, porém tornou a versão da norma NBR 7190-1 (ABNT, 2022) mais rigorosa.

A retirada do k_{mod3} , impactou nos resultados para o início das curvas, com pequenas esbeltezes, resultando em valores de coeficiente de aprovação mais baixos para a norma NBR 7190-1 (ABNT, 2022).

Por meio das análises feitas, foi atendido o objetivo de comparar as versões e verificado que a versão atual da norma, 7190-1 (ABNT, 2022) apresentou-se mais simplificada e, em geral, mais rigorosa, quanto à verificação das barras.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço à orientadora Christiane A. Trindade pela paciência, bondade e ajuda na elaboração deste trabalho. Agradeço aos avaliadores da banca. Agradeço a UFMS por me proporcionar estudo de qualidade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10520

_____. (1997). NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro.

_____. (1997). NBR 7190-1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro, 2022.

DIAS; ANTONIO ALVES; [et al.]. **Estruturas de madeira: projetos, dimensionamento e exemplos de cálculos**. 1. ed. - Rio de Janeiro; Elsevier, 2019.

GEHRI, E. (2000). A nova versão do Eurocode 5. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7., 2000, São Carlos.

IBRAMEM. Segundo a norma NBR7190: 2022, o que mudou no dimensionamento de pilares em madeira? YouTube, 30 de maio de 2023. Disponível em: < https://youtu.be/tk2FaPa_zlc>. Acesso em 28 de junho de 2024.

LARSEN, HANS; VAHIK, ENJILY. **Practical desing of timber structures to Eurocod 5**. London, UK. Thomas Telford Ltd, 2009.

MIOTTO, José Luiz. **AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO PARA PEÇAS COMPRIMIDAS E FLEXOCOMPRIMIDAS DE MADEIRA**. Orientador: Prof. Dr. Antonio Alves Dias. 2003. 204 p. Dissertação de mestrado (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

PFEIL, WALTER; PFEIL, MICHÉLE. **ESTRUTURAS DE MADEIRA**. Rio de Janeiro, RJ. LTC, 2003.

PONTES, Felipe S. **Comparação da Norma ABNT-NBR 7190(1997) e sua proposta de revisão**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2019.

TIMOSHENKO & GERE. **Mecânica dos sólidos**. vol 2. Rio de Janeiro: LTC, 1984.