



ESTABILIDADE EM PEÇAS DE MADEIRA: COMPARAÇÃO DE CRITÉRIOS NORMATIVOS

TIMBER STRUCTURES STABILITY: COMPARISON BETWEEN CODES

Sato, Julie Naomi⁽¹⁾; Mascia, Nilson Tadeu⁽²⁾ *

⁽¹⁾ Engenheira civil, Unicamp, Campinas, Brasil

⁽²⁾ Professor titular, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Unicamp, Campinas, Brasil

* Contacto: ntm@unicamp.br

CÓDIGO: 4611803

Resumo

A norma brasileira para Projetos de Estruturas de Madeira ABNT-NBR 7190 de 1997 substituiu a anterior ABNT-NB 11 de 1951, provocando profundas alterações nos seus conceitos de segurança e proporcionou inegáveis e inúmeras vantagens nos procedimentos de verificação e dimensionamento de elementos estruturais. No entanto, as dificuldades de cálculo do método de dimensionamento proposto pela ABNT-NBR 7190/1997, especialmente o dimensionamento de peças comprimidas e flexocomprimidas com relação à condição de segurança a estabilidade, fizeram com que o modelo proposto sofresse diversas críticas. Nesse contexto, em 2011 foi formulado o projeto de norma da ABNT-NBR 7190, que teve sua última revisão em 2013, com uma grande diferença nos critérios de dimensionamento e de verificação de estabilidade. Desta forma, neste trabalho foi realizada uma análise comparativa dos métodos de cálculo da ABNT-NBR 7190/1997, do Projeto de Revisão da NBR 7190 e da norma européia, o Eurocode 5 de 2004. Baseado nos resultados obtidos, pode-se afirmar que o método adotado pelo Projeto de Revisão da ABNT-NBR 7190, de um modo geral, é o mais conservador. Os valores resultantes dos critérios desse projeto de revisão são inferiores ao da norma Eurocode 5, exceto no intervalo definido pela NBR 7190/1997 de peças medianamente esbeltas, em que os valores obtidos pelos critérios da NBR 7190/97 são inferiores em alguns casos. Observou-se ainda que o método proposto pelo Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) tornou o cálculo da estabilidade mais expedito e simples de ser aplicado.

Palavras-chave: Estruturas de madeira, estabilidade, flexocompressão, normas.

Abstract

The Brazilian ABNT-NBR 7190 of 1997 replaced the previous ABNT-NB 11 of 1951, causing deep changes in its concepts of safety and provided undeniable and numerous advantages in the procedures of verification and sizing of structural elements. However, the difficulties of calculating the sizing method proposed by ABNT-NBR 7190/1997, especially the dimensioning of pieces subjected to compression and combined compression and bending with respect to the safety stability condition, made the proposed model suffer several criticisms. In this context, in 2011, the draft standard of ABNT-NBR 7190 was formulated, which had its last revision in 2013, with a great difference in the stability verification and sizing design criteria. Thus, a comparative analysis of the calculation methods of ABNT-NBR 7190/1997, the Draft Review of NBR 7190 and the European standard, Eurocode 5 of 2004, was carried out. Based on the results obtained, it can be stated that the method adopted by the Proposed Review of ABNT-NBR 7190, in general, is the most conservative. The values resulting from the criteria of this revision project are lower than those of the Eurocode 5 standard, except in the interval defined by NBR 7190/1997 of medium slender pieces, where the values obtained by the criteria of NBR 7190/1997 are lower in some cases. It was also observed that the method proposed by the NBR 7190 (2013) Revision Project made the calculation of stability expeditious and easy-to-use.

Keywords: Timber structures, stability, compression-bending, codes.



1. INTRODUÇÃO

A substituição da norma brasileira de projetos de estruturas de madeira NB 11-ABNT (1951) pela NBR 7190-ABNT (1997) trouxe profundas alterações nos seus conceitos, com inúmeras vantagens nos conceitos de segurança (Fusco et al.1996). De uma norma determinista de tensões admissíveis passa-se a uma norma probabilista de estados limites, fazendo com que o dimensionamento em regime de ruptura permita a racionalização da segurança das estruturas.

Contudo, assim que publicada, Miotto (2003) comenta que a NBR 7190-ABNT (1997) recebeu muitas críticas com relação ao dimensionamento de peças comprimidas e flexocomprimidas, particularmente quanto ao procedimento de cálculo e verificação de estabilidade. Essas críticas eram voltadas sobre a natureza complexa de algumas equações propostas e as descontinuidades abruptas apresentadas no diagrama que representa a variação da resistência de cálculo segundo os diferentes índices de esbeltez. Desta forma, Miotto (2003) realizou uma avaliação teórica dos critérios da NBR 7190-ABNT (1997) para a verificação da estabilidade de peças solicitadas à compressão e à flexocompressão, comparando-os com as recomendações das normas de outros países, visando orientar o estabelecimento de um processo de cálculo com uma desejável objetividade e subsidiar possíveis alterações no documento normativo brasileiro.

Baraldi e Logsdon (1998), Gehri (2000) e Santos (2000 e 2002) e Miotto e Dias (2006), entre outros, constataram um problema de descontinuidade abrupta no diagrama de variação da resistência de cálculo com os diferentes índices de esbeltez, decorrente da consideração de excentricidades e efeitos de fluência de forma diferenciada no intervalo de índices de esbeltez.

Dentro desse contexto, em 2011 formulou-se a proposta de norma da NBR 7190-ABNT (1997) e a revisão do seu texto mais recente ocorreu em 2013, sendo esse o 2º Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013), em que propõe critérios de verificação de segurança a estabilidade de maneira semelhante aos critérios da norma europeia, o EUROCODE 5 (2004).

Sob esta ótica, este trabalho visou dar continuidade nos estudos sobre o tema, focando em peças de madeira serrada sujeitas à compressão e à flexocompressão com relação à condição de segurança a estabilidade e comparar os esforços de cálculo resultantes segundo os critérios propostos pela norma: brasileira e seu projeto de revisão e a norma europeia.

2. CRITÉRIOS NORMATIVOS

São apresentados os critérios normativos essenciais para a elaboração desse trabalho no tocante aos métodos de dimensionamento, para peças serradas sujeitas à compressão e flexocompressão paralelas as fibras e referentes à condição de segurança à estabilidade.

2.1. Critérios relativos à NBR 7190-ABNT (1997)

Segundo a NBR 7190-ABNT (1997), para a obtenção do valor de cálculo da resistência da madeira a partir do seu valor característico deve-se introduzir o coeficiente de minoração e o coeficiente de modificação, que leva em conta influências não consideradas pelo coeficiente de minoração, como efeitos da duração do carregamento e da umidade do meio ambiente sobre a propriedades de resistência da madeira. O módulo de elasticidade efetivo que reflete a rigidez da peça é obtido a partir do coeficiente de modificação e do módulo de elasticidade médio. Além disso, a norma brasileira apresenta as classes de resistência das madeiras com propriedades padronizadas separadas em coníferas e dicotiledôneas.

Com relação as condições de verificação a estabilidade, a NBR 7190-ABNT(1997) classifica as peças comprimidas em três categorias a partir do índice de esbeltez, λ . Nesse índice é considerado apenas os comprimentos de flambagem, L_0 , para duas situações, ou seja, barras biarticuladas, com L_0 igual a distância entre os apoios, e engatadas livre com L_0 igual a duas vezes o comprimento



da barra. Para $0 < \lambda \leq 40$, as peças são classificadas como curtas, para $40 < \lambda \leq 80$, como medianamente esbeltas e para $80 < \lambda \leq 140$ como esbeltas.

Na hipótese de peça curta, a peça deve ser verificada somente pela condição de resistência às tensões normais de compressão ou flexocompressão paralelas as fibras se for o caso, sendo dispensada a consideração de eventuais efeitos de flexão e a verificação de estado limite último de instabilidade. Nas demais hipóteses, a verificação de segurança relativa à estabilidade deve ser feita admitindo-se uma excentricidade acidental mínima, uma excentricidade inicial mínima, além de acréscimos nas excentricidades devidos aos efeitos de segunda ordem (Alvim 2009). Para peças esbeltas, uma excentricidade relativa à fluência deve ser considerada. Desta forma, considera-se atendida a condição de segurança relativa ao estado limite último de instabilidade, para as peças medianamente esbeltas e esbeltas, quando respeitada a seguinte condição conforme a Equação 1:

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad (1)$$

onde:

- $\sigma_{Nc,d}$ é o valor de cálculo da parcela de tensão normal atuante em virtude apenas da força normal de compressão,
- $\sigma_{M,d}$ é o valor de cálculo da parcela de tensão de compressão devida ao momento fletor,
- $f_{c0,d}$ é o valor de cálculo da resistência da madeira à compressão paralela as fibras.

Esse momento é calculado como uma ampliação do momento inicial e envolvendo a força normal e a excentricidade devida ao efeito de segunda ordem.

2.2. Critérios relativos ao EUROCODE 5 (2004)

Segundo o EUROCODE 5 (2004), para o valor de cálculo da resistência da madeira a partir do seu valor característico deve-se introduzir o coeficiente de ponderação e o coeficiente de modificação, de modo análogo à norma brasileira. Quanto ao módulo de elasticidade longitudinal ajustado ao quantil 5% da distribuição de frequências, utilizado no cálculo de verificação de estabilidade, o EUROCODE 5(2004) não o define, assim como as classes de resistência das madeiras e os comprimentos de flambagem, sendo necessário recorrer a normas complementares, como as relações indicadas por Porteous e Kermani (2007).

Com relação as condições de verificação a estabilidade, o EUROCODE 5 (2004) classifica as peças comprimidas em duas categorias conforme o índice de esbeltez relativo, λ_{rel} . Para $\lambda_{rel,x} \leq 0,3$ e $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$, sendo x e y eixos principais de inércia, as tensões normais devem satisfazer as verificações de resistência da peça. Para todos os outros casos, as tensões devem satisfazer as condições descritas no código normativo. O EUROCODE 5 (2004) utiliza, em as seguintes expressões para os índices de esbeltez relativo, de acordo com a Equação 2 e a Equação 3:

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (2)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (3)$$

Onde:

- $\lambda_{rel,x}$ e λ_x são índices de esbeltez relativo e convencional correspondentes à flexão no eixo x;



- $\lambda_{rel,y}$ e λ_y são índices de esbeltez relativo e convencional correspondentes à flexão no eixo y;
- $f_{c0,k}$ é o valor característico da resistência da madeira à compressão paralela as fibras;
- $E_{0,05}$ é o valor do módulo de elasticidade longitudinal ajustado ao quantil 5% da distribuição de frequências.

Nas situações de verificações de segurança que dependem da rigidez da madeira para peças sujeitas à compressão e à flexocompressão, o EUROCODE 5 (2004) utiliza o módulo de elasticidade longitudinal ajustado ao quantil 5% da distribuição de frequências, que pode ser obtido por expressões referidas no EN 338 (2009) como:

$$E_{0,05} = 0,67 * E_{0,mean} \text{ para coníferas (softwoods) e}$$

$$E_{0,05} = 0,84 * E_{0,mean} \text{ para dicotiledôneas (hardwoods),}$$

onde: $E_{0,mean} = E_{c0,m}$ é o valor médio do módulo de elasticidade à compressão.

Para $\lambda_{rel,x} \leq 0,3$ e $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$, as tensões normais devem satisfazer as verificações de resistência de flexocompressão (Equação 4 e a Equação 5) e para todos os outros casos, as tensões devem satisfazer as seguintes condições de estabilidade. Com relação às condições de verificação ao estado limite último de instabilidade, os critérios seguem o mesmo modelo do EUROCODE 5 (2004), observando-se que há uma diferença nas expressões de verificação, cujos valores da resistência de cálculo a flexão são substituídos pelo valor de cálculo da resistência da madeira à compressão paralela as fibras.

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,x} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + k_m * \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} * f_{c,0,d}} + k_m * \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (5)$$

Onde K_m vale 0,7 para seção retangular. Os outros parâmetros são definidos pelas Equação 6, Equação 7, Equação 8 e Equação 9:

$$k_{c,x} = \frac{1}{k_x + \sqrt{k_x^2 - \lambda_{rel,x}^2}} \quad (6)$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (7)$$

$$k_x = 0,5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{rel,x} - 0,3) + \lambda_{rel,x}^2) \quad (8)$$

$$k_y = 0,5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad (9)$$

β_c é um fator para peças dentro dos limites de divergência de alinhamento permitidos pelo EUROCODE 5 (2004): vão/500 para madeira laminada colada e LVL (Laminated veneer lumber) e vão/300 para madeira sólida. Para madeira serrada $\beta_c = 0,2$.

2.3. Critérios relativos ao 2º Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013)

Segundo o Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013), o valor de cálculo da resistência da madeira é calculado da mesma maneira que a NBR 7190-ABNT (1997) e quanto ao



módulo de elasticidade longitudinal ajustado ao quantil 5% da distribuição de frequências, utiliza-se um fator constante de 0,7 do valor médio do módulo de elasticidade à compressão. Quanto as classes de resistência, o Projeto de Revisão da norma brasileira classifica somente as classes de resistência para espécies de madeira na floresta tropical (folhosas), de modo semelhante à classe das dicotiledôneas da NBR 7190 (1997), e inclui as classes de resistência para espécies de madeiras de florestas plantadas, cujas classes são semelhantes às referenciadas pelo EUROCODE 5 (2004).

Os comprimentos de flambagem dependem das condições de vinculação das extremidades das barras e são ligeiramente superiores aos teóricos, pois os vínculos não possuem ligações totalmente rígidas, mas semirrígidas (Negrão e Faria 2009).

Com relação às condições de verificação ao estado limite último de instabilidade, os critérios seguem o mesmo modelo estabelecido pelo EUROCODE 5 (2004), observando-se que há uma diferença nas expressões de verificação, cujos valores da resistência de cálculo a flexão são substituídos pelo valor de cálculo da resistência da madeira à compressão paralela as fibras.

Para tornar claro as verificações da instabilidade quanto ao uso das expressões do EUROCODE 5 (2004) adotadas no Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013), ou seja, para as situações de $\lambda_{rel,x} \leq 0,3$ e $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$, são apr, adaptadas as classes de resistência da

norma brasileira e que tem base na equação, isto é, $\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$, sendo nesse caso

não colocado os índices x ou y nos índices de esbeltez. Pode-se verificar que para $\lambda_{rel} = 0,3$ os valores de λ situam-sentre 15 e 20 para as diversas classes.

A Figura 1 apresenta uma relação mais próxima a esta ao se utilizar a Equação 4 e a Equação 5. Pode-se notar que a partir de $\lambda = 40$ há uma nítida redução de K_c similar ao que ocorre nos diagramas de tensão normais de compressão e índice de esbeltez λ .

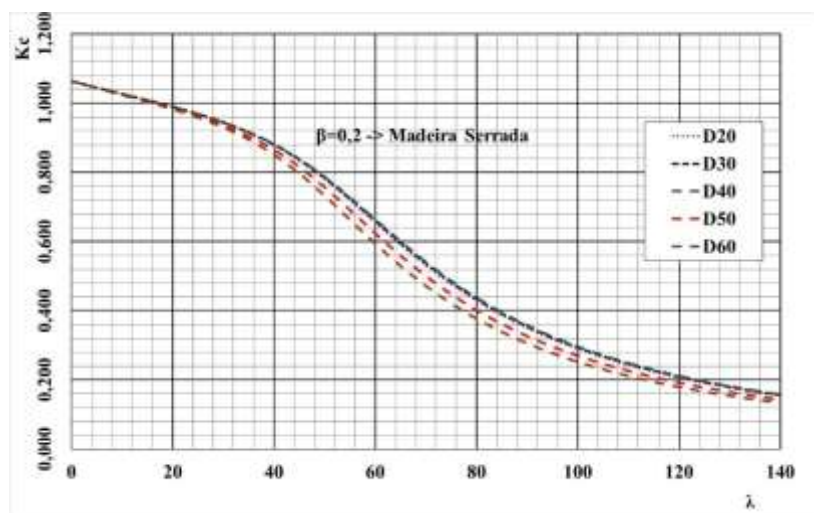


Figura 1: Relação entre parâmetro K_c os índices de esbeltez convencional.

Nessas situações de verificações de segurança que dependem da rigidez da madeira, o módulo de elasticidade paralelamente às fibras deve ser tomado com o valor característico para verificação de peças comprimidas e flexocomprimidas, ou seja $E_{0,05} = 0,7 * E_{c0,m}$. Observa-se ainda que para peças que compõem pórticos, pilares ou vigas em que a instabilidade lateral pode ocorrer, o desvio no alinhamento axial da peça, medido na



metade da distância entre os apoios, deverá ser limitado em: vão/300 para peças de madeira serrada ou roliça, vão/500 para peças de madeira laminada colada.

3. MÉTODO DE ANÁLISE

O estudo realizado analisa e compara os métodos normativos brasileiros com a europeia a fim de buscar diferenças e semelhanças entre eles. Para que a comparação seja realizada foi necessário a definição de alguns parâmetros iniciais.

Para simplificação dos cálculos, foram adotadas somente peças de madeira serrada com seção transversal retangular e extremidades biarticuladas. Escolheu-se seções transversais convencionais com dimensões 6 cm por 12 cm.

Foram realizados cálculos adotando-se a propriedade de resistência e rigidez da classe C60 do tipo dicotiledônea fornecida pela NBR 7190 (ABNT,1997) para a avaliação numérica. Nesse caso tem-se a resistência característica à compressão paralela às fibras igual a 60 MPa, e o módulo de elasticidade médio à compressão paralela às fibras igual a 24.500 MPa. No entanto, na norma europeia utiliza-se a resistência a flexão nas expressões de verificação das peças flexocomprimidas. Como essa propriedade não é contemplada nas tabelas da NBR 7190 (ABNT,1997), realizou-se dois casos para a verificação de estabilidade nos critérios do EUROCODE 5 (2004): substituição dos parâmetros de resistência a flexão como primeiro caso, empregando os valores de resistência à compressão $f_{c0,d}$ e como segundo caso, utilizando os valores de resistência à tração $f_{t0,d}$. Para o cálculo da resistência à tração, a NBR 7190-ABNT (1997) permite adotar a relação $f_{c0,k}/f_{t0,k} = 0,77$ na falta de determinação experimental.

Fez-se, de forma análoga, a avaliação numérica adotando a propriedade de resistência e rigidez da classe D60 do tipo folhosas de madeiras plantadas fornecida pelo 2º Projeto de Revisão da NBR 7190. Neste caso, como tal tabela define o valor de resistência a flexão, utilizou-se esse valor nas expressões de verificação das peças flexocomprimidas segundo critérios do EUROCODE 5 (2004). Nota-se que no Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) há uma tabela, na qual são apresentadas as classes de resistência para coníferas e folhosas (dicotiledôneas), mas a classe correspondente a C60, denominada D60, tem a resistência característica à flexão de 60 MPa e à compressão paralela às fibras de 32 Mpa. Em outra tabela, Tabela 2, desse projeto de revisão são apresentados os valores das classes de resistência para as folhosas, e neste caso somente são listados os valores característicos de compressão paralela e para a classe D60 a resistência vale 60 Mpa.

Optou-se por definir a classe de resistência por valor da compressão de 32 MPa, seguindo o projeto de norma para mostrar uma análise distinta da relativa à classe C60.

Neste estudo, admitiu-se os mesmos valores de carregamento e coeficientes adotados por Miotto (2003). Desta forma, considerou-se carregamento composto apenas por ações permanentes, com $k_{mod,1} = 0,6$, madeira na categoria seca, com $k_{mod,2} = 1,0$ e finalmente, madeira de 1ª categoria, com $k_{mod,3} = 1,0$. Assim como em Miotto (2003), os fatores não contemplados pela NBR 7190-ABNT (1997) serão adotados como valor unitário. Observa-se ainda que para considerar o efeito da fluência no cálculo da excentricidade para peças esbeltas quando utilizada a NBR 7190-ABNT (1997) foi considerado o caso o coeficiente de fluência igual a 0,8.

Neste trabalho são analisados casos de compressão simples e flexocompressão, adotando-se excentricidades iniciais que provocam uma flexão sobre o eixo de menor inércia.



Devido as interpretações divergentes de diversos autores, tais como Pfeil e Pfeil (2003), analisou-se ambos os casos: uma com a excentricidade inicial e_i nula e outra com um valor mínimo descrito na NBR 7190-ABNT (1997) de $h/30$, sendo h a altura da seção transversal referente ao plano de verificação. Além desses dois casos, considerou-se ainda a situação mais solicitante, com excentricidade $h/2$. Apesar das normas estudadas exigirem verificações para a condição de segurança relativa à resistência de peças comprimidas e flexocomprimidas, este estudo foca somente em verificações de segurança em relação ao estado limite último de instabilidade.

Os dados resultantes são ilustrados na forma de gráficos N_d/A vs λ , permitindo-se a visualização das tensões máximas em relação aos valores de índice de esbeltez, parâmetro de uso convencional no estudo sobre estabilidade à compressão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foram considerados apenas as propriedades de resistência e rigidez da classe C60 do tipo dicotiledônea fornecida pela NBR 7190-ABNT (1997) equivalentes a D60 do Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013), isto é, a resistência característica à compressão paralela às fibras, igual a 60 MPa, e o módulo de elasticidade médio à compressão paralela às fibras igual a 24.500 Mpa. A resistência de cálculo é dada por:

$$f_{c0,d} = k_{mod} * \frac{f_{c0,k}}{\gamma_w} \quad (10)$$

A avaliação numérica é dividida em duas partes: a primeira: a classe C60 da NBR 7190-ABNT (1997); a segunda: a classe D60 do Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013).

4.1. Avaliação numérica dos critérios normativos classe C60 da NBR 7190 - ABNT (1997)

A Figura 2 apresenta os resultados para compressão centrada paralela as fibras, sendo as propriedades de resistência e rigidez da classe C60 NBR 7190-ABNT (1997).

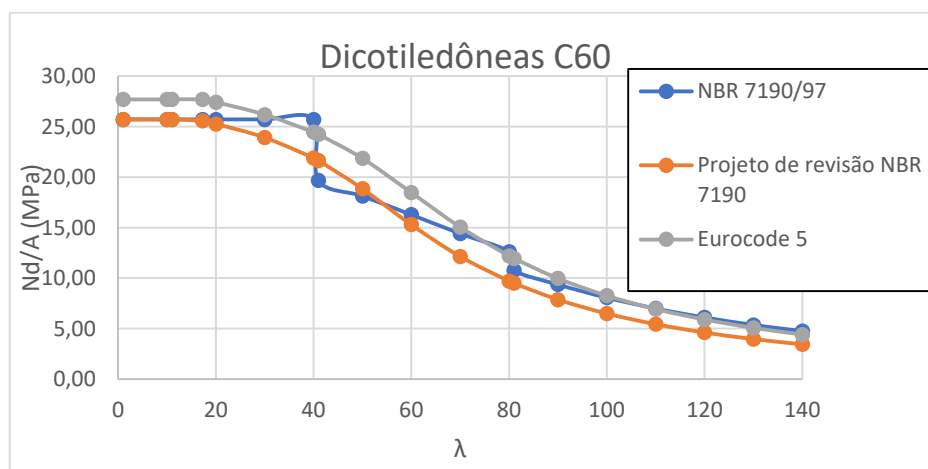


Figura 2: Comparação para dicotiledôneas (folhosa) classe C60 submetidas à compressão centrada.



A partir da análise dos dados da Figura 2, é possível observar que não há descontinuidades nas curvas do EUROCODE 5 (2004) e do Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) para peças submetidas à compressão centrada paralela as fibras, enquanto que para NBR 7190-ABNT (1997) há para o valor de $\lambda = 40$ acentuada variação. Os valores do Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) são, de um modo geral, inferiores comparado a NBR 7190-ABNT (1997), exceto no intervalo entre os índices de esbeltez 40 e 60, na qual a situação inverte. Em relação ao EUROCODE 5 (2004), o Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) apresenta maiores divergências de valores para índices de esbeltez maiores em dicotiledôneas, com valores de N_d 22% inferiores.

Para a análise de peças flexocomprimidas considerou-se dois casos de excentricidades iniciais: $h/30$ e $h/2$. A Figura 3 mostra os resultados para o segundo caso. Em ambos os casos observa-se uma descontinuidade nas curvas do EUROCODE 5 (2004) e do Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) no ponto em que $\lambda_{rel} = 0,3$, ou ao redor de $\lambda = 16$ para essa classe de madeira, na qual as normas sugerem condições de verificação a estabilidade de forma distinta para λ_{rel} superiores e inferiores.

Quando submetidas à flexocompressão com excentricidade inicial, verifica-se que os valores do Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) possuem valores inferiores em comparação com a NBR 7190-ABNT (1997), exceto no intervalo dos índices de esbeltez de 40 a 60, na qual a situação inverte, de modo semelhante à situação de compressão centrada. Os dados resultantes da aplicação do EUROCODE 5 (2004), superam os dados do Projeto de Revisão da NBR 7190/2013 em aproximadamente 20% quando substituído o parâmetro de resistência à flexão pelo o valor de resistência à compressão e em aproximadamente 25% quando utilizado o valor de resistência à tração.

Para peça sujeita à flexocompressão com excentricidade inicial $h/2$, os valores resultantes dos critérios do Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) assemelham-se com os valores da NBR 7190-ABNT(1997), exceto no intervalo entre os índices de esbeltez 20 e 40, no qual os resultados da NBR 7190-ABNT (1997) superam os do Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) em 23%. Os dados resultantes do EUROCODE 5 (2004), superam os dados do Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) até 30% quando utilizado o valor de resistência à compressão e em até 60% quando utilizado o valor de resistência à tração.

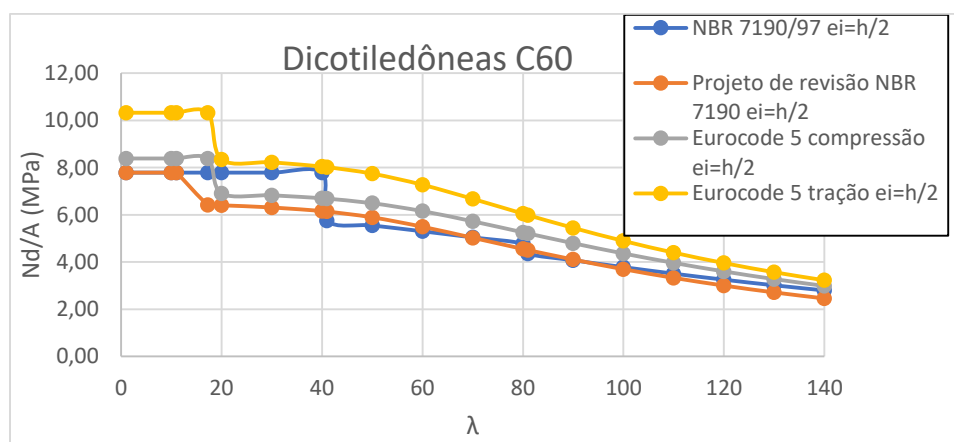


Figura 3: Comparação para dicotiledôneas classe C60 submetidas à flexocompressão com excentricidade inicial $h/2$.



5. CONCLUSÃO

À luz dos resultados obtidos, pode-se afirmar que o método adotado pelo Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013), de um modo geral, é o mais conservador. Os valores resultantes dos critérios do Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) são inferiores aos da NBR 7190-ABNT (1997) e do EUROCODE 5 (2004), exceto no intervalo definido pela NBR 7190-ABNT (1997) de peças medianamente esbeltas, em que os valores obtidos pelos critérios da NBR 7190-ABNT (1997) são inferiores em alguns casos.

Os critérios adotados pelo Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) são análogos ao modelo da norma europeia, como é possível verificar pela semelhança nas tendências das curvas apresentadas nos gráficos. A diferença entre os valores se deu devido a diferentes parâmetros empregados por cada norma, como o módulo de elasticidade medido na direção paralela as fibras e a resistência a flexão. Destaca-se que no caso de peças flexocomprimidas, o EUROCODE 5 (2004) utiliza a resistência de cálculo a flexão ($f_{m,x,d}$ e $f_{m,y,d}$), parâmetro não definido na NBR 7190-ABNT(1997). Assim nos cálculos, os valores de resistência à flexão foram substituídos pelos de resistência à tração e à compressão, ou seja, um caso em que $f_{m,k} = f_{c0,k}$ e outro que $f_{m,k} = f_{t0,k} = f_{c0,k}/0,77$. Para a compressão centrada, nota-se uma linha retilínea para valores baixos de índice de esbeltez, em que $\lambda_{rel} \leq 0,3$. Nas condições de flexocompressão, marca-se negativamente as descontinuidades nas curvas no intervalo de índice de esbeltez entre 15 e 20.

No caso das espécies de florestas plantadas, o Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) fornece valores de resistência a flexão, não sendo necessária a substituição desse parâmetro pela resistência à compressão e à tração nas verificações do EUROCODE 5 (2004). Observou-se que os valores de resistência à flexão são, em geral, mais elevados em comparação com os valores de resistência à compressão e à tração. Devido a essa divergência, destaca-se a notável diferença entre os resultados do Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) e do EUROCODE 5 (2004).

A simplicidade de aplicação dos métodos do Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013) e do EUROCODE 5 (2004) merecem destaque quando comparada com o método da NBR 7190 -ABNT (1997). Contudo, o projeto da norma brasileira e o da norma europeia tem como pontos negativos a imposição de diferentes condições de verificação, o que resultou nas descontinuidades observada nos gráficos, e a falta de informações quanto à consideração dos efeitos de segunda ordem, conforme Miotto (2003).

Para trabalhos futuros seria interessante considerar a resistência à flexão analogamente ao EUROCODE 5 (2004), para possível consideração deste parâmetro na norma brasileira, evitando valores de N_d muito inferiores ao que a peça poderia suportar. Além disso, é importante que os efeitos de segunda ordem na verificação de estabilidade no Projeto de Revisão da NBR 7190 (2013), estejam colocadas de modo mais claros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio institucional da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC), UNICAMP, para a realização desta pesquisa.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvim, R., C. Projeto de estruturas de madeira: peças compostas comprimidas. São Paulo: Blucher Acadêmico, 2009.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT/CB-02: 2º PN Revisão ABNT 7190. 2013.
- Baraldi, L.T.; Logsdon, N.B. (1998). Dimensionamento de elementos estruturais submetidos à compressão paralela – uma discussão da NBR 7190/97. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., 1998, Florianópolis. Anais... Florianópolis, UFSC-IBRAMEM. v.2, p.157-168.
- European Committee for Standardization. EUROCODE 5: Design of Timber Structures. 2004.
- European Committee for Standardization. EN 338: Structural timber – Strength classes. 2009.
- Fusco, P.B.; Calil Junior, C.; Almeida, P.A.O. (1996). Norma de projeto de estruturas de madeira. BT/PEF/9702, ISSN 0103-9822, São Paulo.
- Gehri, E. (2000). A nova versão do Eurocode 5. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7., 2000, São Carlos.
- Miotto, J.L. (2003). Avaliação dos critérios de dimensionamento para peças comprimidas e flexocomprimidas de madeira. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Miotto, J.L.; Dias, A.A. (2006). Avaliação dos critérios de dimensionamento para peças comprimidas e flexocomprimidas de madeira. Cadernos de Engenharia das Estruturas, São Carlos, v.8, n.33, p. 53-81.
- Negrão, J., Faria, A. (2009). Projecto de Estruturas de madeira. Publindustria, Edições Técnicas.
- Pfeil, W.; Pfeil, M. Estruturas de Madeira (2003) 6a.ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- Porteous, J; Kermani, A. (2007) Structural timber design to Eurocode 5. Blackwell Publishing Ltd.
- Santos, L. B.; Morales, E. A. M.; Lahr, F. A. R. (2002). Algumas considerações sobre os critérios propostos pela NBR 7190/97 para a verificação da segurança em pilares de madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. Anais... Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia.