

## 4 AVALIAÇÃO NUMÉRICA DOS CRITÉRIOS NORMATIVOS

Neste capítulo, as peças comprimidas axialmente e flexocomprimidas são avaliadas sob os critérios da norma brasileira e de outros países. Os resultados alcançados são comparados quantitativamente e se comentam os aspectos envolvidos com a objetividade na obtenção dos dados.

### 4.1 Informações preliminares

Em estruturas de madeira, a seção transversal retangular é uma das mais comuns. Amparando-se nessa constatação, adotou-se essa forma de seção transversal para as análises subseqüentes. Visando parametrizar os resultados, escolheu-se uma relação entre a altura e a largura da seção transversal igual a  $h/b=2$ , pois representa bitolas tradicionalmente comercializadas. Adotou-se, neste estudo, que as extremidades das barras são biarticuladas. É possível, a partir desse modelo, avaliar o comportamento de peças com outras condições de apoio, a partir das relações indicadas pelos textos normativos avaliados.

No caso de peças flexocomprimidas, os resultados conseguidos pelos métodos das diferentes normas serão comparados para peças solicitadas por força de compressão excêntrica, gerando uma flexão sobre o eixo de menor inércia, como indicado na Figura 3.1, ou seja, com  $M_y = 0$ . Admitiu-se dois casos para estudo: uma excentricidade inicial equivalente a  $e_i = 0,1 \cdot b$  e uma outra igual a  $e_i = 0,5 \cdot b$ .

Dentre os documentos normativos avaliados, somente a NBR 7190/97 apresenta a fluência como uma excentricidade suplementar de 1ª ordem. Assim, a excentricidade devida à fluência e a acidental serão somente consideradas no cálculo das peças segundo os critérios da norma brasileira, já que as demais normas ponderam essas propriedades de forma diferenciada em seus critérios.

Nas análises a seguir, as propriedades de resistência e de rigidez estabelecidas são adotadas a partir das classes de resistência das coníferas e dicotiledôneas da NBR 7190/97. Entretanto, diversos documentos normativos, aqui estudados, empregam a resistência característica à flexão nas expressões de verificação das peças flexocomprimidas. Como o documento normativo brasileiro não contempla essa propriedade em suas tabelas, utilizando-se as expressões propostas para estimar as resistências na caracterização simplificada das madeiras, foi possível constatar que:

$$f_{M,k} = 1,30 \cdot f_{c0,k} \quad [4.1]$$

A NBR 7190/97 recomenda a utilização do módulo de elasticidade longitudinal efetivo ( $E_{c0,ef}$ ) nas situações de verificação dos estados limites últimos ou de utilização. Alguns documentos normativos de outros países ajustam esse parâmetro ao 5º quantil das distribuições normais de frequência, às vezes para refletir os efeitos da fluência da madeira. Quando for necessária a substituição pelo módulo de elasticidade ajustado, estará sendo empregada a Equação [4.2], com o coeficiente de variação  $\delta = 0,25$ :

$$E_{0,05} = E_{c0,m} \cdot (1 - 1,645 \cdot \delta) \quad [4.2]$$

O carregamento atuante nas peças em estudo foi admitido como sendo composto apenas por ações permanentes, especialmente devido às dificuldades impostas pelo método proveniente da norma brasileira. Dessa forma, o coeficiente  $k_{mod,1} = 0,6$ . Admitiu-se que a madeira empregada se enquadra na categoria de madeira seca; conseqüentemente, o coeficiente de modificação  $k_{mod,2} = 1,0$ . Finalmente, admitiu-se que a madeira utilizada é de 1ª categoria para permitir a comparação com as demais normas, que exigem a classificação visual ou mecânica da madeiras; logo,  $k_{mod,3} = 1,0$ . Os fatores de ajuste não contemplados pela NBR 7190/97 serão admitidos com valores unitários para não interferir nas comparações.

A determinação da resistência de cálculo,  $N_d$ , de acordo com os critérios da NBR 7190/97, especialmente para as peças esbeltas, conduziu à resolução de equações transcendentais, solucionadas com o auxílio de recursos computacionais. Ainda que alguns códigos normativos, inclusive a NBR 7190/97, apresentem diferentes expressões para as verificações

de resistência e de instabilidade das peças flexocomprimidas, este trabalho restringe-se à inspeção das condições de estabilidade.

Os dados resultantes da aplicação dos critérios normativos são ilustrados na forma de diagramas  $N_d / A \times \lambda$ , por permitirem uma clara visualização do comportamento do elemento estrutural segundo os diferentes índices de esbeltez, justificando a recorrência a este modelo ao longo deste texto. Todavia, os resultados numéricos alcançados são apresentados em forma tabular, nos Anexos deste trabalho. A obtenção dos dados e gráficos foi possível com a utilização de programas computacionais tais como: o *Excel2000* da Microsoft e o *Mathcad8 Professional* da MathSoft, Inc.

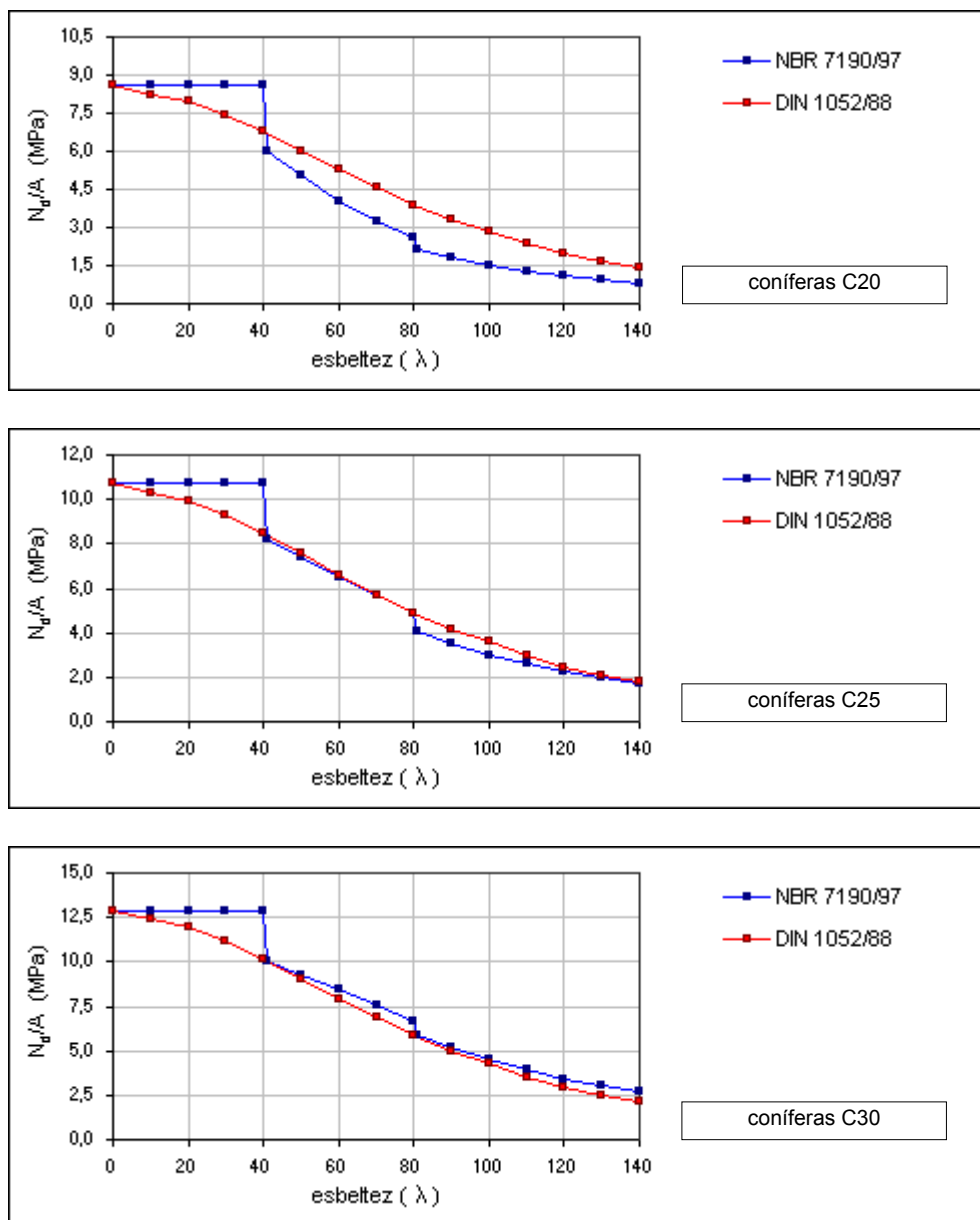
## 4.2 Critérios da norma alemã

A fundamentação da norma alemã no método das tensões admissíveis acarretou uma dificuldade inicial no estabelecimento dos parâmetros envolvidos na determinação do esforço de cálculo  $N_d$ . Para solucionar o problema resultante da divergência de fundamentação dos métodos, admitiu-se que a tensão admissível à compressão paralela às fibras,  $\bar{\sigma}_{D,0}$ , fosse equivalente ao valor de projeto da resistência à compressão nessa direção,  $f_{c0,d}$ , calculada segundo as recomendações da NBR 7190/97.

A obtenção dos valores de  $N_d$  para as peças axialmente comprimidas é feita através das Equações [2.52] e [2.53], com extrema simplicidade; os dados resultantes estão representados nas Figuras 4.1 e 4.2, para as diferentes classes de resistência das madeiras brasileiras. Destaca-se, de antemão, que as curvas resultantes da aplicação das recomendações da DIN 1052/88 não apresentam quaisquer discontinuidades ao longo de todo o intervalo analisado.

A imposição da condição de resistência da NBR 7190/97, para as peças curtas, faz com que os resultados dessa norma superem em 26% e 25% aqueles determinados pela norma alemã, para as coníferas e dicotiledôneas, respectivamente, quando  $\lambda = 40$ . Para as peças medianamente esbeltas e esbeltas é marcante a contigüidade entre os resultados, exceto para as coníferas de classe C20, em que os valores obtidos pela norma alemã, por exemplo, superam em 91% os da norma brasileira, quando  $\lambda = 100$ . Para as coníferas de classe C30,

os resultados conseguidos pela norma brasileira superam os da norma alemã em 22%, quando  $\lambda = 140$ . Menores diferenças, normalmente favoráveis à norma brasileira e que não ultrapassam 16%, marcam o comportamento das dicotiledôneas quando  $\lambda > 40$ .



**Figura 4.1** – Comparação entre a DIN 1052/88 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: coníferas.

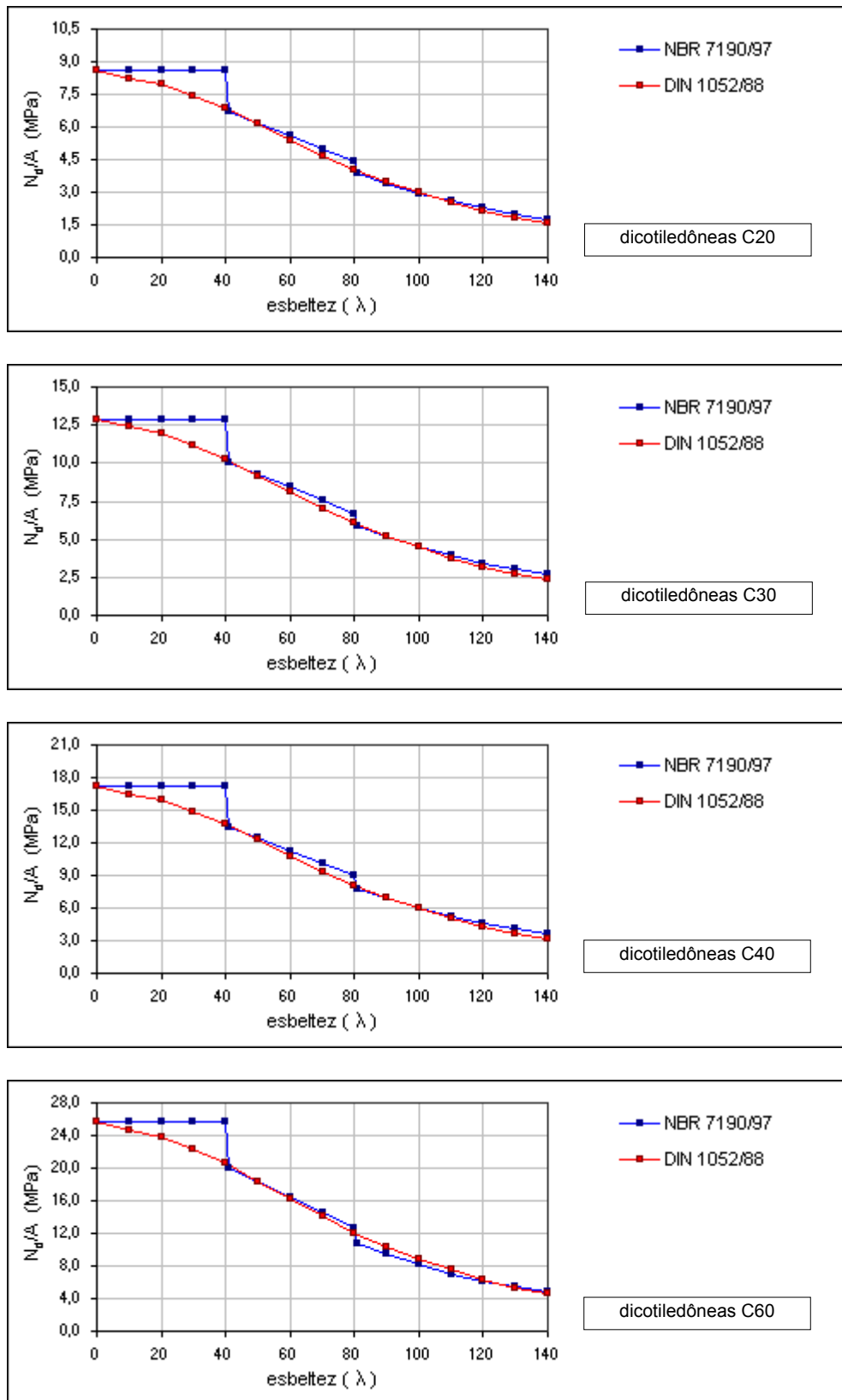


Figura 4.2 – Comparação entre a DIN 1052/88 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: dicotiledóneas.

A verificação da estabilidade das peças flexocomprimidas, segundo as recomendações da DIN 1052/88, se faz pelo atendimento da Expressão [2.55], que é função da tensão admissível à flexão. Calculou-se a resistência característica à flexão pela Equação [4.1] e, em seguida, aplicou-se o critério dado pela Equação [2.14] para a determinação do valor de projeto da resistência à flexão, com os mesmos coeficientes de modificação e de minoração descritos na seção anterior. Então, a tensão admissível à flexão foi tomada como equivalente ao valor de projeto da resistência à flexão,  $f_{M,d}$ .

O índice de esbeltez das peças sujeitas à flexão,  $\lambda_B$ , depende do módulo de torção,  $G_T$ , como indica a Equação [2.59]. Conforme a DIN 1052/88, para a madeira serrada é possível afirmar que  $G_T = 2/3 \cdot G$ . Por sua vez, a norma brasileira afirma que o módulo de elasticidade transversal pode ser estimado pela relação:  $G = E/20$ . Então, é possível determinar o módulo de torção a partir do módulo de elasticidade paralelo às fibras por:

$$G_T = \frac{E}{30} \quad [4.3]$$

O desempenho das peças flexocomprimidas, de acordo com os critérios das normas brasileira e alemã, está representado nas Figuras 4.3 e 4.4, considerando-se as duas situações de excentricidades iniciais descritas.

A norma brasileira admite, para as coníferas e dicotiledôneas em peças curtas, valores de  $N_d$  até 25% superiores aos permitidos pela norma alemã, quando a excentricidade inicial é  $0,1 \cdot b$ . Para essas mesmas peças, quando a excentricidade é  $0,5 \cdot b$ , a diferença diminui significativamente, não atingindo 7% em favor da norma alemã.

As peças medianamente esbeltas e esbeltas, calculadas conforme estas duas normas, não têm um comportamento homogêneo, especialmente nas coníferas com excentricidade inicial igual a  $0,1 \cdot b$ . Na classe C20, o esforço de projeto obtido pela DIN 1052/88 supera o da norma brasileira em 90% quando  $\lambda = 100$ . Essa diferença vai diminuindo à medida que melhoram as propriedades de resistência e rigidez da madeira; o esforço de projeto, determinado pela NBR 7190/97, supera em 11% o da norma alemã, para as coníferas da classe C30 com  $\lambda = 140$ . Para as dicotiledôneas, sujeitas a essa mesma excentricidade

inicial, as diferenças são menores, não se ultrapassando 23% em favor da norma alemã, quando  $\lambda = 90$ .

Ainda para as peças medianamente esbeltas e esbeltas, porém agora sujeitas a uma excentricidade inicial equivalente a  $0,5 \cdot b$ , observa-se que a DIN 1052/88 é menos conservadora que a norma brasileira, pois admite valores aproximadamente 72% acima, quando  $\lambda = 100$  e a madeira é a conífera de classe C20. Nas peças medianamente esbeltas ou esbeltas, em que a madeira é do tipo dicotiledônea, o comportamento é similar; o esforço de projeto obtido conforme a norma alemã supera em 38% aquele determinado segundo a norma brasileira, quando  $\lambda = 90$  e a madeira é da classe C60.

De um modo geral, é possível constatar-se que os esforços de projeto obtidos segundo as recomendações das duas normas aqui confrontadas não apresentam grandes disparidades, exceto para as coníferas de classe C20 e que, na medida em que a excentricidade inicial aumenta, as diferenças entre os resultados válidos para as peças medianamente esbeltas e esbeltas também aumentam.

Destaca-se como vantagem, em favor do código alemão, que uma única expressão é suficiente para examinar o desempenho das peças com quaisquer índices de esbeltez. Embora o método apresentado pela DIN 1052/88 para a avaliação da estabilidade das peças flexocomprimidas seja de fácil aplicação, não leva em conta a fluência e os efeitos de segunda ordem. Um outro aspecto é a ausência de indicação de validade dessa expressão para a flexo-compressão oblíqua. A verificação opcional destas peças pela teoria de segunda ordem, proposta pela norma alemã, não foi analisada nas simulações deste trabalho.

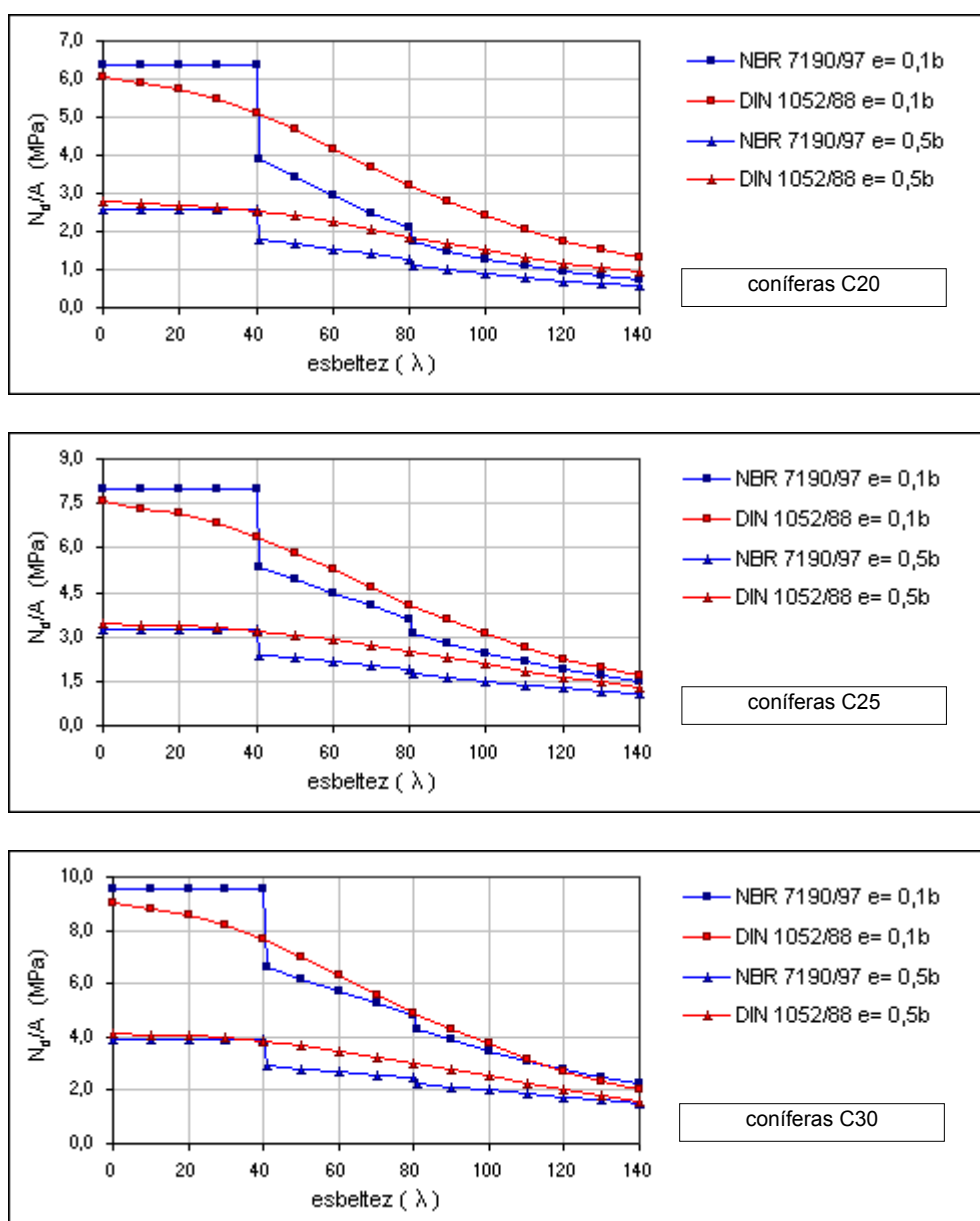


Figura 4.3 – Comparação entre a DIN 1052/88 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: coníferas.



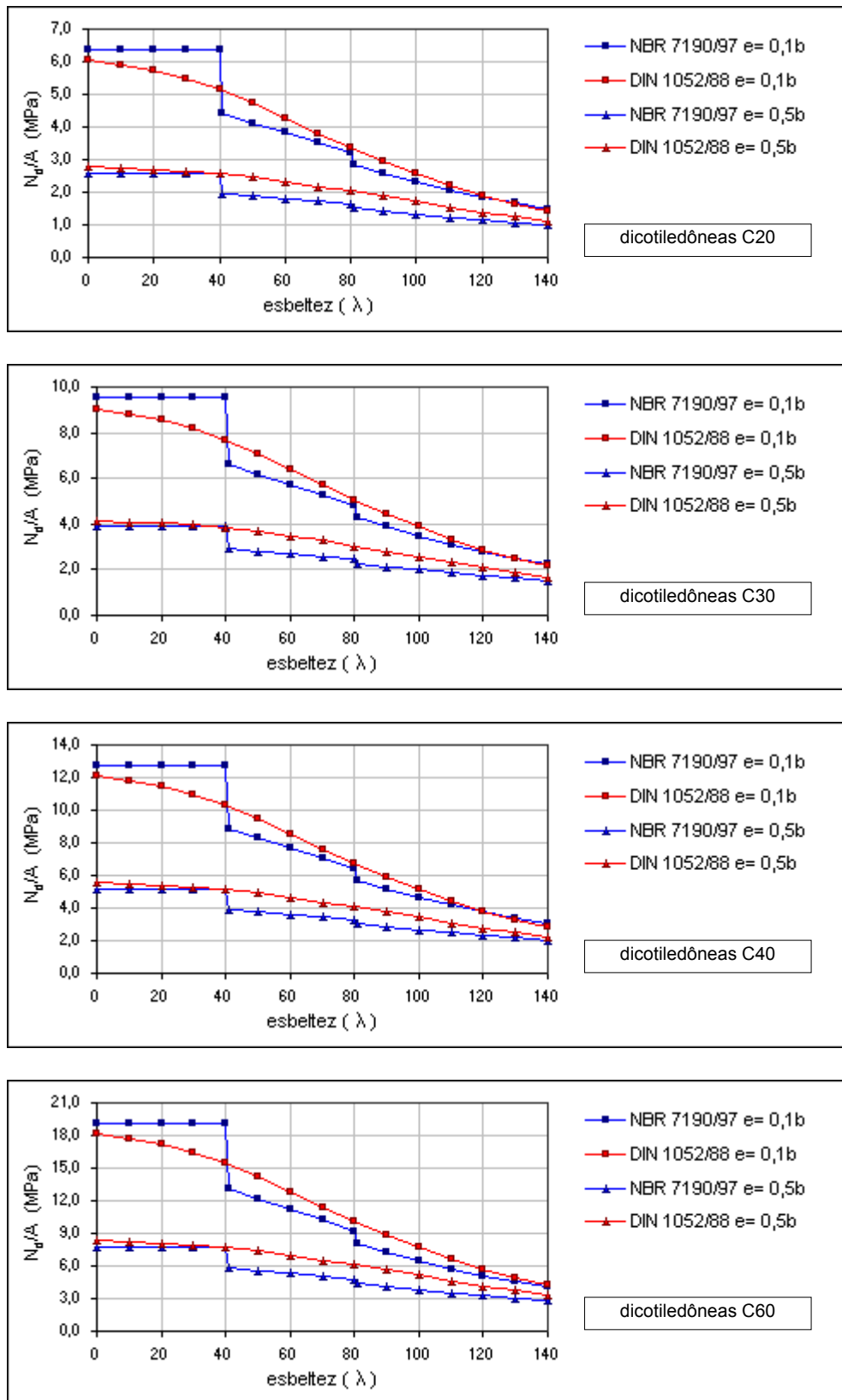


Figura 4.4 – Comparação entre a DIN 1052/88 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: dicotiledôneas.