

José Luiz Miotto

**AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE
DIMENSIONAMENTO PARA PEÇAS COMPRIMIDAS
E FLEXOCOMPRIMIDAS DE MADEIRA**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Alves Dias

São Carlos

2003

*À minha mãe Helena e
ao meu pai Octávio (in memoriam)*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela generosa distribuição de dons sem os quais seria impossível a concretização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Antonio Alves Dias, pela primorosa orientação e zelo durante a execução deste e, sobretudo, pelo respeito e amizade.

Ao Centro Universitário Filadélfia – UniFil, pelo apoio e colaboração financeira.

Às minhas irmãs e demais familiares, que souberam superar pacientemente a minha ausência e manifestaram os indispensáveis incentivos para o empreendimento de todo o meu esforço.

A todos os colegas – em especial ao amigo Jorge Luís Nunes de Góes –, professores e funcionários do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras da EESC/USP, que direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade.

Nunca se achou que o degrau de uma escada se destinasse a alguém permanecer em cima dele, mas sim que se destina a sustentar o pé de um homem pelo tempo suficiente para que coloque o outro um pouco mais alto.

Thomas Huxley (1825-1895)

RESUMO

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, 2003.

A recente revisão da NBR 7190/97 culminou em avanços inegáveis no projeto das estruturas de madeira. As excentricidades acidentais, amplificação das excentricidades e efeitos da fluência incidem diferentemente no cálculo das peças curtas, medianamente esbeltas ou esbeltas, estabelecendo descontinuidades nos diagramas de esforços de projeto em função da esbeltez das barras comprimidas ou flexocomprimidas. Associando-se a outras particularidades, como a complexidade de algumas de suas expressões, esse modelo tem sido alvo freqüente de críticas. Neste trabalho são avaliados os critérios propostos para a verificação da estabilidade de peças de madeira serrada, nas solicitações de compressão e flexo-compressão, pelos documentos normativos: alemão, australiano, canadense, europeu e norte-americanos. Essas recomendações são confrontadas com as da norma brasileira, comparando-se a objetividade dos métodos e os resultados alcançados. A proposição da AF&PA/ASCE 16-95/96 para o dimensionamento das peças comprimidas demonstra grande praticidade e continuidade nos diagramas $N_d \times \lambda$, evitando as críticas que se conectam aos critérios da norma brasileira. Por outro lado, as prescrições dessa mesma norma para as peças flexocomprimidas – embasadas em argumentos teóricos convincentes – evitam as deficiências constatadas nas propostas da norma brasileira, concordando com os propósitos de sugestão para uma necessária reformulação normativa.

Palavras-chave: projeto de estruturas de madeira; dimensionamento de elementos estruturais de madeira; compressão e flexo-compressão.

ABSTRACT

MIOTTO, J.L. (2003). *Evaluation of design criteria for timber members in compression and in combined bending and axial compression*. M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

The recent revision of NBR 7190/97 culminated in undeniable progresses in the project of the timber structures. The accidental eccentricities, amplification of the eccentricities and the creep effects happen differently in calculation of the short members, the middling slenders or the slenders ones, establishing discontinuities in the diagrams of the design forces in function of slenderness of the members in compression and in combined bending and axial compression. Being associated to other particularities, as the complexity of some of its equations, that model has been often criticized. In this work, the proposed criteria for the verification of the stability of sawed timber members – in compression and in combined bending and axial compression – are appraised for the following normative documents: German, Australian, Canadian, European and North Americans. Those recommendations are confronted with the Brazilian code ones, comparing the objectivity of the methods and the gained results. The proposition of AF&PA/ASCE 16-95/96 for the compressed members design demonstrates great practicality and continuity in the diagrams $N_d \times \lambda$, avoiding the critics that are connected to the criteria of the Brazilian code. On the other hand, the prescriptions of that same code for the members in combined bending and axial compression – based in convincing theoretical arguments – avoid the deficiencies verified in the proposal of the Brazilian code, agreeing with the purposes for suggestion in a necessary normative reformation.

Keywords: design of timber structures; design criterion for timber members; compression and combined bending and axial compression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curva tensão-deformação utilizada no modelo de Buchanan	5
Figura 2.2 – Interação entre a flexão e ações axiais de tração e compressão	6
Figura 2.3 – Representação tridimensional da flexo-compressão em função da esbeltez	6
Figura 2.4 – Comparação das equações de Ylinen, Perry-Robertson e Neubauer	10
Figura 2.5 – Curvas de resistência à compressão segundo os critérios da NBR 7190/97	24
Figura 2.6 – Diagramas $\sigma \times \varepsilon$ para a madeira	25
Figura 2.7 – Ajuste da curva de resistência à compressão	28
Figura 2.8 – Pórtico bi-rotulado com treliça horizontal	32
Figura 2.9 – Pórtico	32
Figura 2.10 – Peça com excentricidade acidental, “e”, na condição descarregada	36
Figura 2.11 – Pórticos, colunas e filas de colunas tendo uma declividade acidental	37
Figura 2.12 – Notação para restrições em peças comprimidas	43
Figura 2.13 – Notação para a seção transversal retangular	44
Figura 2.14 – Flexão associada com cargas axiais de compressão	51
Figura 2.15 – Indicação dos eixos de flexão	57
Figura 2.16 – Fator de duração de carregamento para várias durações de carga	62
Figura 2.17 – Peça comprimida simples em madeira serrada	65
Figura 2.18 – Curva para peças comprimidas Ylinen	66
Figura 2.19 – Efeito da duração do carregamento	68
Figura 2.20 – Peça sujeita à flexo-compressão	70
Figura 2.21 – Peça flexocomprimida – indicação das excentricidades	72
Figura 3.1 – Peça solicitada à flexo-compressão	86
Figura 3.2 – Fator de esbeltez da norma alemã	87
Figura 3.3 – Variação do fator de esbeltez para peças flexionadas	88
Figura 3.4 – Fator de esbeltez da norma australiana	90
Figura 3.5 – Condições de estabilidade na flexo-compressão segundo a norma australiana	91
Figura 3.6 – Representação da superfície estável sujeita à flexo-compressão oblíqua, segundo a norma australiana	92
Figura 3.7 – Fator de esbeltez da norma canadense	93
Figura 3.8 – Fator de esbeltez da norma europeia	97
Figura 3.9 – Fator de esbeltez da norma NDS/91	99

Figura 3.10 – Curvas de interação para peças flexocomprimidas, com diferentes índices de esbeltez, segundo a NDS/91	100
Figura 3.11 – Variação do fator de estabilidade em função de α_c	101
Figura 3.12 – Fator de esbeltez da norma AF&PA/ASCE 16-95/96	102
Figura 3.13 – Interação entre a flexão e o esforço axial de compressão	103
Figura 4.1 – Comparação entre a DIN 1052/88 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: coníferas	109
Figura 4.2 – Comparação entre a DIN 1052/88 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: dicotiledôneas	110
Figura 4.3 – Comparação entre a DIN 1052/88 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: coníferas	113
Figura 4.4 – Comparação entre a DIN 1052/88 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: dicotiledôneas	114
Figura 4.5 – Comparação entre a AS 1720.1/97 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: coníferas	117
Figura 4.6 – Comparação entre a AS 1720.1/97 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: dicotiledôneas	118
Figura 4.7 – Comparação entre a AS 1720.1/97 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: coníferas	121
Figura 4.8 – Comparação entre a AS 1720.1/97 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: dicotiledôneas	122
Figura 4.9 – Comparação entre a CSA 086.1/89 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: coníferas	124
Figura 4.10 – Comparação entre a CSA 086.1/89 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: dicotiledôneas	125
Figura 4.11 – Comparação entre a CSA 086.1/89 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: coníferas	127
Figura 4.12 – Comparação entre a CSA 086.1/89 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: dicotiledôneas	128
Figura 4.13 – Comparação entre o EUROCODE 5/93 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: coníferas	130
Figura 4.14 – Comparação entre o EUROCODE 5/93 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: dicotiledôneas	131
Figura 4.15 – Comparação entre o EUROCODE 5/93 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: coníferas	133
Figura 4.16 – Comparação entre o EUROCODE 5/93 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: dicotiledôneas	134
Figura 4.17 – Comparação entre a NDS/91 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: coníferas	136
Figura 4.18 – Comparação entre a NDS/91 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: dicotiledôneas	137
Figura 4.19 – Comparação entre a NDS/91 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: coníferas	140

Figura 4.20 – Comparação entre a NDS/91 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: dicotiledôneas	141
Figura 4.21 – Comparação entre a AF&PA/ASCE 16-95/96 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: coníferas	144
Figura 4.22 – Comparação entre a AF&PA/ASCE 16-95/96 e a NBR 7190/97. Peças comprimidas. Madeira: dicotiledôneas	145
Figura 4.23 – Comparação entre a AF&PA/ASCE 16-95/96 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: coníferas	148
Figura 4.24 – Comparação entre a AF&PA/ASCE 16-95/96 e a NBR 7190/97. Peças flexocomprimidas. Madeira: dicotiledôneas	149
Figura 4.25 – Comportamento das peças flexocomprimidas sujeitas à excentricidade inicial igual a $10.b$	151
Figura 4.26 – Evolução das flechas devidas à fluência com o carregamento de uma barra curva comprimida excentricamente	152
Figura 4.27 – Contribuição das excentricidades na tensão máxima atuante em peças esbeltas com $e_r = 0,1b$ – caso 1	154
Figura 4.28 – Contribuição das excentricidades na tensão máxima atuante em peças esbeltas com $e_r = 0,5b$ – caso 1	154
Figura 4.29 – Contribuição das excentricidades na tensão máxima atuante em peças esbeltas com $e_r = 0,1b$ – caso 2	155
Figura 4.30 – Contribuição das excentricidades na tensão máxima atuante em peças esbeltas com $e_r = 0,5b$ – caso 2	155
Figura 4.31 – Contribuição das excentricidades na tensão máxima atuante em peças esbeltas com $e_r = 0,1b$ – caso 3	156
Figura 4.32 – Contribuição das excentricidades na tensão máxima atuante em peças esbeltas com $e_r = 0,5b$ – caso 3	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores do coeficiente de modificação, $k_{\text{mod},1}$	14
Tabela 2.2 – Valores do coeficiente de modificação, $k_{\text{mod},2}$	14
Tabela 2.3 – Coeficientes de fluência, ϕ	21
Tabela 2.4 – Fatores de incisão, C_i	63
Tabela 4.1 – Fatores de estabilidade ajustados pelos dados da NBR 7190/97	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AF&PA	American Forest and Paper Association
AS	Australian Standards
ASCE	American Society of Civil Engineers
CSA	Canadian Standards Association
CWC	Canadian Wood Council
DIN	Deutsches Institut für Normung
EUROCODE	European Standard
LRFD	Load and Resistance Factor Design
MEL	Machine Evaluated Lumber
MSR	Machine Stress Rated Lumber
NB	Norma Brasileira
NBCC	National Building Code of Canada
NBR	Norma Brasileira Revisada
NDS	National Design Specification

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas:

- A Área da seção transversal;
- A_n Área líquida da seção transversal;
- B_b Fator de amplificação do momento fletor de primeira ordem;
- B_s Fator de amplificação do momento fletor de primeira ordem;
- C_D Fator de duração do carregamento – normas norte-americanas;
- C_E Fator de composição de peças – normas norte-americanas;
- C_f Fator de forma – normas norte-americanas;
- C_{fu} Fator de uso – normas norte-americanas;
- C_F Fator de dimensão – normas norte-americanas;
- C_H Fator de cisalhamento – normas norte-americanas;
- C_i Fator de incisão – normas norte-americanas;
- C_L Fator de estabilidade lateral – normas norte-americanas;
- C_m Parâmetro que relaciona a forma do diagrama de momentos real a um diagrama de momento uniforme equivalente;
- C_M Fator de umidade de serviço – normas norte-americanas;
- C_n Produto de todos os fatores de ajuste aplicáveis – normas norte-americanas;
- C_P Fator de estabilidade de pilares – normas norte-americanas;
- C_{pt} Fator de tratamento preservativo – normas norte-americanas;
- C_r Fator de compartilhamento de carga – normas norte-americanas;
- C_{rt} Fator de tratamento retardante da ação do fogo – normas norte-americanas;
- C_t Fator de temperatura – normas norte-americanas;
- C_T Fator de rigidez à flambagem – normas norte-americanas;
- D Dano acumulado;
- E Módulo de elasticidade longitudinal;
- E' Módulo de elasticidade longitudinal – valor ajustado;
- $E_{e0,ef}$ Módulo de elasticidade longitudinal – valor efetivo;
- $E_{e0,m}$ Módulo de elasticidade longitudinal – valor médio;

E_S	Módulo de elasticidade longitudinal – valor ajustado;
$E_{0,05}$	Módulo de elasticidade longitudinal referente ao 5º quantil;
$E_{0,k}$	Módulo de elasticidade longitudinal – valor característico;
E'_{05}	Módulo de elasticidade longitudinal referente ao 5º quantil – valor ajustado;
F_E	Carga crítica de Euler;
G	Módulo de elasticidade transversal;
G_T	Módulo de torção;
I	Momento de inércia;
I_0	Momento de inércia das barras inclinadas em pórticos bi ou triarticulados;
K_{bE}	Coefficiente de flambagem de Euler para vigas – NDS;
K_{cE}	Coefficiente de flambagem de Euler para peças comprimidas – NDS;
K_C	Fator de esbeltez – norma canadense;
K_D	Fator de duração do carregamento – norma canadense;
K_e	Fator de comprimento efetivo;
K_H	Fator de sistema – norma canadense;
K_r	Rigidez rotacional;
K_S	Fator de condição de serviço – norma canadense;
K_{Sc}	Fator de condição de serviço para compressão paralela às fibras – norma canadense;
K_{SE}	Fator de condição de serviço para rigidez – norma canadense;
K_T	Fator de tratamento – norma canadense;
K_Z	Fator de dimensão – norma canadense;
K_{Zc}	Fator de dimensão para compressão paralela às fibras – norma canadense;
L	Dimensão, comprimento;
L_a	Distância entre pontos de restrição rígida efetiva;
L_e	Comprimento efetivo;
L_{e1}	Comprimento efetivo na direção 1;
L_{e2}	Comprimento efetivo na direção 2;
L_u	Comprimento – distância entre travejamentos laterais;

L_0	Comprimento de flambagem;
M	Momento fletor;
M_b	Momento de primeira ordem, gerado pelas ações que não resultam em apreciável deslocamento lateral – valor de projeto;
M_{cr}	Momento crítico correspondendo à flambagem lateral, calculado de acordo com a teoria clássica da estabilidade;
M_d	Momento fletor de 2ª ordem – valor de projeto;
M_e	Momento de flambagem lateral elástica;
$M_{L,d}$	Momento fletor devido somente ao carregamento lateral – valor de projeto;
M_m	Momento fletor solicitante incluindo qualquer amplificação gerada pelos efeitos de segunda ordem – valor de projeto;
M_r	Momento fletor resistente;
M_{rd}	Momento fletor resistente – valor de projeto;
M_{sd}	Momento fletor solicitante – valor de projeto;
M_{sx}	Momento de primeira ordem na direção do eixo x, gerado pelas ações que resultam em apreciável translação lateral – valor de projeto;
M_{sy}	Momento de primeira ordem na direção do eixo y, gerado pelas ações que resultam em apreciável translação lateral – valor de projeto;
M	Momento fletor;
M_x^*	Momento resistente de peças curtas segundo o eixo x – valor de projeto;
M_1	Momento de flambagem lateral-torsional elástica de M_z ou momento fletor de extremidade de menor magnitude;
M_2	Momento fletor de extremidade de maior magnitude;
M_{1d}	Momento fletor de primeira ordem – valor de projeto;
M_{1gd}	Momento fletor provocado pela ação permanente – valor de projeto;
M_{1qd}	Momento fletor provocado pelas ações variáveis – valor de projeto;
N	Esforço normal de compressão;
N_c	Esforço resistente à compressão paralela às fibras de peças curtas;
\bar{N}_c	Esforço resistente à compressão paralela às fibras de peças curtas ajustado;
N_d	Esforço normal de compressão – valor de projeto;
N_d^*	Esforço resistente à compressão paralela às fibras de uma peça curta – valor de projeto;

N_e	Esforço crítico de flambagem (Euler);
N_E	Esforço crítico de flambagem (Euler);
N_{gd}	Esforço normal devido às ações permanentes – valor de projeto;
N_{gk}	Esforço normal devido às ações permanentes – valor característico;
$N_{k,real}$...	Carregamento característico real;
N_{qk}	Esforço normal devido às ações variáveis – valor característico;
N_r	Capacidade nominal de uma peça comprimida;
N_{rd}	Esforço resistente na direção paralela às fibras – valor de projeto;
N_{sd}	Esforço solicitante axial de compressão – valor de projeto;
N_0	Esforço normal de compressão na barra inclinada de pórticos bi ou triarticulados;
R	Resistência nominal (ou capacidade nominal);
R_d	Resistência – valor de projeto;
R_B	Índice de esbeltez para peças submetidas à flexão;
R_k	Resistência característica;
S_d	Solicitação – valor de projeto;
X	Propriedade geométrica seccional de uma peça;
X_d	Propriedade de resistência ou rigidez – valor de projeto;
X_k	Propriedade de resistência ou rigidez – valor característico;
W_n	Módulo de resistência efetivo;
W	Módulo de resistência.

Letras romanas minúsculas:

- b Largura da seção transversal retangular;
- c Distância do eixo neutro até a fibra mais afastada na flexão; parâmetro que relaciona as inércias com os comprimentos de barras na norma alemã ou constante de ajuste na fórmula de Ylinen;
- c_b Constante de ajuste na fórmula de Ylinen para a flexo-compressão;
- d Dimensão da seção transversal;
- d_n Distância nuclear;
- d_1 Dimensão da face larga da seção transversal retangular;
- d_2 Dimensão da face estreita da seção transversal retangular;
- e Excentricidade;
- e_a Excentricidade acidental mínima;
- e_c Excentricidade suplementar de 1ª ordem;
- e_i Excentricidade inicial;
- e_{ig} Excentricidade inicial devida às ações permanentes;
- e_1 Excentricidade de primeira ordem;
- $e_{1,ef}$ Excentricidade de primeira ordem – valor efetivo;
- e_2 Excentricidade na metade da altura de uma barra birotulada;
- f_b^* Resistência à flexão multiplicada por todos os fatores de ajuste, exceto o C_L – valor de projeto;
- f_{c0} Resistência à compressão paralela às fibras;
- f'_{c0} Resistência à compressão paralela às fibras reduzida pela esbeltez;
- $f_{c0,d}$ Resistência à compressão paralela às fibras – valor de projeto;
- $f_{c0,d}^*$ Resistência à compressão paralela às fibras de peças curtas – valor de projeto;
- $f_{c0,k}$ Resistência à compressão paralela às fibras – valor característico ou especificado;
- f_E Tensão crítica;
- f_k Resistência característica;
- $f_{m,d}$ Resistência à flexão – valor de projeto;
- f_M Resistência à flexão;
- $f_{M,d}$ Resistência à flexão – valor de projeto;

$f_{M,k}$	Resistência à flexão – valor característico;
f'_{M1}	Resistência à flexão sobre o eixo de maior inércia reduzida pela esbeltez;
f_{M2}	Resistência à flexão sobre o eixo de menor inércia;
h	Altura da seção transversal retangular ou comprimento de uma barra;
h_u	Comprimento de uma barra de pórtico;
h_0	Comprimento de uma barra de pórtico ou treliça;
i	Raio de giração;
i_{\min}	Raio de giração mínimo;
j_2	Fator de fluência – norma australiana;
k	Fatores (ou produto de fatores) de modificação segundo a norma australiana;
k_B	Coefficiente aplicado à parcela da flexão na verificação das peças flexocomprimidas segundo a norma alemã;
k_c	Fator de estabilidade da norma européia ($k_{c,y}$ ou $k_{c,z}$);
k_{crit}	Fator que leva em conta a resistência reduzida devida à flambagem lateral;
k_{eu}	Fator de relação entre a tensão crítica de Euler e o valor característico da resistência à compressão paralela às fibras – norma norueguesa;
k_h	Fator multiplicador da resistência característica à flexão ou fator de altura da norma norueguesa;
k_{mod}	Coefficientes de modificação – norma brasileira;
$k_{\text{mod},1}$	Coefficiente de modificação – classe de carregamento;
$k_{\text{mod},2}$	Coefficiente de modificação – classe de umidade;
$k_{\text{mod},3}$	Coefficiente de modificação – tipo de classificação da madeira;
k_m	Coefficiente de correção – norma européia;
k_M	Coefficiente de correção – norma brasileira;
k_R	Relação entre inércias e esforços axiais aplicados em barras de pórticos bi ou triarticulados, conforme a norma alemã;
k_{vippp}	Fator de flambagem da norma norueguesa;
k_y	Fator da norma européia ($= k_z$);
k_λ	Fator de correção devido à flambagem – norma norueguesa;
k_1	Fator de duração do carregamento – norma australiana;

k_4	Fator de condição de umidade – norma australiana;
k_6	Fator de temperatura – norma australiana;
k_8	Fator de compartilhamento de carga – norma australiana;
k_{12}	Fator de estabilidade – norma australiana;
m	Fator da fórmula de Perry-Robertson;
r	Razão entre o carregamento temporário e o carregamento total;
s	Comprimento de barra inclinada em pórticos ou distância entre pontos fixos;
u_L	Deslocamento devido ao carregamento lateral;
u_T	Deslocamento lateral total;
u_0	Deslocamento horizontal;
v_0	Deslocamento vertical;

Letras romanas minúsculas subscritas:

x	Coordenada;
y	Coordenada;
z	Coordenada.

Letras gregas:

α	Coeficiente adimensional;
α_b	Relação entre o momento de flambagem lateral elástica e o momento resistente de peças curtas;
α_c	Relação entre a força crítica de Euler e a resistência de uma peça curta à compressão paralela às fibras;
α_1	Constante que depende do tipo de carregamento aplicado;
β	Coeficiente de amplificação das flechas de primeira ordem;
β_c	Constante da norma européia;
Δ	Deformação lateral relativa, deformação;
ε	Deformação específica longitudinal;
$\bar{\varepsilon}_{o,c}$	Deformação unitária específica na direção longitudinal devida à fluência;
ϕ	Fator de performance; fator de capacidade; coeficiente de fluência;
ϕ_b	Fator de resistência para peças sujeitas à flexão – LRFD;
ϕ_c	Fator de resistência para compressão paralela às fibras – LRFD;
ϕ_s	Fator de estabilidade – LRFD;
ϕ_1	Coeficiente de fluência para carregamentos permanente ou de longa duração;
ϕ_2	Coeficiente de fluência para carregamentos de média ou de curta duração;
γ	Constante relativa à seção transversal;
γ_M	Coeficiente de ponderação – EUROCODE 5;
γ_w	Coeficiente de minoração das propriedades da madeira;
γ_1	Fator de majoração para os casos de carregamento H e HZ – norma alemã;
γ_2	Fator de majoração – norma alemã;
η	Coeficiente de curvatura inicial da norma alemã ou parâmetro ajustável da fórmula de Perry-Robertson;
η_1	Constante que depende do tipo de carregamento aplicado;
η_2	Constante que depende do tipo de carregamento aplicado;
λ	Índice de esbeltez;
λ_B	Fator de esbeltez das peças flexionadas – norma alemã;
λ_C	Índice de esbeltez modificado – norma canadense;
λ_{rel}	Índice de esbeltez relativa – norma européia;

- λ_s Índice de esbeltez modificado (λ_{sx} ou λ_{sy}) – norma australiana;
- λ_t Fator de efeito de tempo – LRFD;
- λ_u Índice de esbeltez universal;
- λ_0 Índice de esbeltez acima do qual é aplicável a expressão de Euler;
- μ Fator de amplificação do momento fletor inicial;
- ρ Constante material;
- σ Tensão normal, coeficiente de variação ou desvio padrão;
- σ_b Tensão real de flexão;
- σ_{b1} Tensão real de flexão para o carregamento atuando na face estreitada peça;
- σ_{b2} Tensão real de flexão para o carregamento atuando na face larga da peça;
- $\bar{\sigma}_B$ Tensão admissível à flexão;
- σ'_{b1} Tensão admissível à flexão para carregamento atuante na face estreita da peça;
- σ'_{b2} Tensão admissível à flexão para carregamento atuante na face larga da peça;
- σ_{bE} Tensão crítica de Euler na flexão, incorporando um coeficiente de segurança;
- σ_b Tensão real de flexão;
- σ'_b Tensão admissível à flexão;
- σ_{c0} Tensão real de compressão paralela às fibras – valor calculado;
- $\sigma_{c0,d}$ Tensão de compressão paralela às fibras – valor de projeto;
- $\sigma_{c0,tab}$ Tensão de compressão paralela às fibras – valor tabelado (NDS);
- σ'_{c0} Tensão admissível de compressão paralela às fibras;
- σ_{c0}^* Tensão admissível à compressão paralela às fibras de peças curtas;
- $\sigma_{c90,tab}$ Tensão de compressão normal às fibras – valor tabelado (NDS);
- $\sigma_{c,crit}$ Tensão crítica de Euler;
- σ_{cE} Tensão crítica de Euler para peças comprimidas, incorporando um coeficiente de segurança;
- σ_{cE} Tensão crítica de Euler para peças comprimidas, incorporando um coeficiente de segurança;
- σ_{cE1} Tensão crítica de Euler para peças comprimidas segundo a direção 1, incorporando um coeficiente de segurança;

- σ_{cE2} Tensão crítica de Euler para peças comprimidas segundo a direção 2, incorporando um coeficiente de segurança;
- σ_{cr} Tensão crítica de flambagem;
- $\bar{\sigma}_{D,0}$ Tensão admissível à compressão paralela às fibras;
- σ_{eu} Tensão crítica de Euler calculada com o módulo de elasticidade característico – norma norueguesa;
- $\bar{\sigma}_k$ Tensão admissível à compressão paralela às fibras ajustada;
- $\sigma_{m,c}$ Tensão crítica à flexão;
- $\sigma_{m,d}$ Tensão normal devida ao momento fletor de 1ª ordem – valor de projeto;
- σ_M Tensão normal devida ao momento fletor de 1ª ordem;
- σ_{Md} Tensão de compressão devida ao momento fletor de 2ª ordem – valor de projeto;
- $\sigma_{M,d}$ Tensão máxima devida ao momento fletor atuante;
- σ_{M1} Tensão real de flexão, com carregamento aplicado na face estreita da peça;
- σ_{M2} Tensão real de flexão, com carregamento aplicado na face larga da peça;
- $\sigma_{N,d}$ Tensão normal devida ao esforço de compressão – valor de projeto;
- σ_{t0} Tensão de tração paralela às fibras;
- ω Coeficiente de flambagem da norma alemã;
- Ψ Representação genérica para fórmula ou divergência de projeto na norma alemã;
- Ψ_1 Fator de utilização – norma brasileira;
- Ψ_2 Fator de utilização – norma brasileira.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Justificativa	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Fórmulas para dimensionamento de peças comprimidas e flexocomprimidas	4
2.2 Dimensionamento segundo a norma brasileira	13
2.2.1 Parâmetros para o dimensionamento	13
2.2.1.1 Parâmetros de resistência	13
2.2.1.2 Parâmetros de rigidez	15
2.2.1.3 Parâmetros geométricos	15
2.2.2 Peças comprimidas	16
2.2.3 Peças flexocomprimidas	17
2.2.3.1 Estado limite último: tensões normais	17
2.2.3.2 Estado limite último: instabilidade	18
2.2.4 Considerações sobre os critérios da norma brasileira	22
2.2.4.1 Constatações e propostas de autores nacionais	23
2.3 Dimensionamento segundo as normas de outros países	30
2.3.1 Norma alemã	30
2.3.1.1 Parâmetros de dimensionamento	30
2.3.1.2 Peças comprimidas	32
2.3.1.3 Peças flexocomprimidas	33
2.3.2 Norma australiana	38
2.3.2.1 Parâmetros para o dimensionamento	38

2.3.2.2 Peças comprimidas	43
2.3.2.3 Peças flexocomprimidas	45
2.3.3 Norma canadense	47
2.3.3.1 Parâmetros para o dimensionamento	47
2.3.3.2 Peças comprimidas	50
2.3.3.3 Peças flexocomprimidas	51
2.3.4 Norma da comunidade econômica européia	53
2.3.4.1 Parâmetros para o dimensionamento	53
2.3.4.2 Estados limites últimos	55
2.3.4.3 Instabilidade das peças	56
2.3.5 Norma norte-americana NDS/91	61
2.3.5.1 Fatores de ajuste	61
2.3.5.2 Peças comprimidas	64
2.3.5.3 Peças flexocomprimidas	68
2.3.5.4 Peças com carregamento lateral e excentricidade	70
2.3.6 Norma norte-americana – AF&PA/ASCE 16-95/96	73
2.3.6.1 Condições de referência e fatores de ajuste	73
2.3.6.2 Valores das resistências de projeto (ou ajustadas)	74
2.3.6.3 Peças comprimidas	74
2.3.6.4 Peças flexocomprimidas	77
2.4 Conclusões da revisão bibliográfica	83
3 COMPARAÇÃO TEÓRICA ENTRE A NBR 7190/97 E OUTROS	
DOCUMENTOS NORMATIVOS	86
3.1 Confrontação com a DIN 1052/88	87
3.2 Confrontação com a AS 1720.1/97	89
3.3 Confrontação com a CSA 086.1/89	93
3.4 Confrontação com o EUROCODE 5/93	95
3.5 Confrontação com a NDS/91	98
3.6 Confrontação com a AF&PA/ASCE 16-95/96	100
3.7 Considerações complementares	104
4 AVALIAÇÃO NUMÉRICA DOS CRITÉRIOS NORMATIVOS	106
4.1 Informações preliminares	106
4.2 Critérios da norma alemã	108

4.3 Critérios da norma australiana	115
4.4 Critérios da norma canadense	123
4.5 Critérios da norma da comunidade econômica européia	129
4.6 Critérios da norma norte-americana NDS	135
4.7 Critérios da norma norte-americana LRFD	142
4.8 Grandes excentricidades e efeitos da fluência	150
5 CONCLUSÕES	158
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162
7 BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	166
ANEXO A – Coeficientes das normas de outros países	168
ANEXO B – Esforços resistentes de cálculo segundo as normas analisadas	173