

DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM ALUMÍNIO

Didiane Victoria Buzinelli

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Maximiliano Malite

**São Carlos
2000**

A meus pais Francisco e Veranice
meus irmãos Richard e Rafael
e meu marido César.

Agradeço a Deus pela vida.

Ao professor doutor Maximiliano Malite pela dedicada orientação.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

Aos colegas, professores e funcionários do Departamento de Estruturas da EESC/USP, pela colaboração.

A meus pais pelo amor e dedicação.

A meus irmãos pelo companherismo.

A meu marido pelo amor e carinho.

Sumário

APRESENTAÇÃO	i
LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
RESUMO	xvii
<i>ABSTRACT</i>	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Obtenção e aspectos gerais	1
1.2. Algumas estruturas em alumínio	12
1.3. Histórico sobre as normas de dimensionamento de elementos estruturais em alumínio	24
2. LIGAS ESTRUTURAIS DE ALUMÍNIO	26
2.1. Tipos e classificação	26
2.2. Especificações	29
2.3. Propriedades do material	33
2.3.1. Propriedades mecânicas	33
2.3.2. O efeito da soldagem nas propriedades mecânicas	36
2.3.3. O efeito da temperatura nas propriedades mecânicas	36
2.3.4. Demais propriedades físicas	37
2.3.5. Especificações do material alumínio	38
3. BARRAS SUBMETIDAS À TRAÇÃO	45
4. BARRAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO	54
4.1. Generalidades	49
4.2. Flambagem em barras sujeitas à compressão	56
centrada	

4.2.1. Flambagem global	56
4.2.2. Flambagem local	70
4.2.2.1. Elementos com enrijecedores de borda	79
4.2.2.2. Flambagem local de tubos de seção circular	84
4.2.3. Interação entre flambagem global e local	85
5. BARRAS SUBMETIDAS À FLEXÃO	87
SIMPLES	
5.1. Momento fletor: vigas estáveis lateralmente e de seção compacta	87
5.2. Instabilidade nas barras submetidas à flexão	90
5.2.1. Flambagem lateral com torção (FLT)	92
5.2.2. Flambagem local em elementos de viga	100
5.2.3. Interação entre flambagem global (FLT) e flambagem local	103
5.3. Enrugamento da alma	103
5.4. Enrugamento da alma e flexão combinados	105
5.5. Cisalhamento por flexão	106
6. BARRAS SUBMETIDAS À FLEXÃO COMPOSTA	111
6.1. Flexo-compressão	112
6.2. Flexo-tração	114
6.3. Interação entre força normal de compressão, momento fletor e	115
força	
7. LIGAÇÕES	117
7.1. Ligações com conectores	118
7.1.1. Ligações rebitadas	118
7.1.2. Ligações parafusadas	121
7.1.3. Ligações por pinos	124

7.2. Escolha do material dos elementos de ligação	124
7.3. Propriedades mecânicas dos conectores	125
7.4. Furos	128
7.5. Modos de falha nas ligações parafusadas ou rebitadas	130
7.6. Parafusos submetidos à tração	131
7.7. Parafusos submetidos à força cortante	134
7.8. Parafusos submetidos à tração e força cortante	136
7.9. Pressão de contato em furos e distância entre furo e borda	137
7.10. Espaçamento mínimo entre conectores e distância à borda	139
7.11. Espaçamento máximo entre conectores e distância à borda	141
7.12. Parafusos auto-atarraxantes	142
7.12.1. Tração	142
7.12.2. Cisalhamento	143
7.2. Ligações soldadas	145
8. COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES	152
8.1. Generalidades	152
8.2. Material	153
8.3. Barras submetidas à tração	154
8.4. Barras submetidas à compressão	154
8.5. Barras submetidas à flexão simples e à flexão composta	155
8.6. Ligações	156
8.7. Continuação do trabalho	157
BIBLIOGRAFIA	158

Apresentação

O presente trabalho tem por objetivo apresentar e discutir os critérios de dimensionamento dos elementos estruturais em alumínio, atendendo à uma necessidade da Área de Estruturas Metálicas do SET, que desde de 1993 vem prestando serviços à comunidade e pesquisando ativamente as estruturas espaciais, mais especificamente as treliças de aço e alumínio. A elevada quantidade de treliças espaciais construídas com alumínio no Brasil, empregando geralmente os tubos com extremidade estampada, implicou na proposição deste trabalho, tendo em vista a importância de um sólido conhecimento sobre as características do alumínio e suas ligas, e sobre o dimensionamento de elementos estruturais.

No campo das estruturas metálicas, o dimensionamento de elementos estruturais de aço constitui matéria bem conhecida por parte dos projetistas e pesquisadores e possui ampla bibliografia disponível. Além disso, existe uma norma brasileira relativamente recente, a NBR8800/86, e outra em fase de elaboração referente às estruturas constituídas por perfis formados a frio.

Com relação ao alumínio esta realidade é bem diferente, uma vez que não há norma brasileira sobre o assunto, as normas estrangeiras são de difícil acesso e muitas ainda estão em fase de elaboração, como é o caso do EUROCODE 9 publicado pela primeira vez em 1999, além do que a bibliografia voltada ao dimensionamento de elementos estruturais é escassa. A pesquisa bibliográfica leva as referências voltadas principalmente ao estudo do material, com enfoque metalúrgico e não estrutural.

Finalizando, espera-se que este trabalho traga contribuições dentro e fora do meio acadêmico, suprindo, embora de maneira discreta, a escassez de material técnico sobre o tema.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Fluxograma do processo de produção do alumínio primário	3
Figura 1.2: Fluxograma da fundição do alumínio	4
Figura 1.3: Fluxograma do processo de extrusão de perfis de alumínio	6
Figura 1.4: Fluxograma da laminação de chapas de alumínio	7
Figura 1.5: Vista geral do edifício <i>United Nations Secretariat</i> em Nova Iorque	13
Figura 1.6: Detalhe dos painéis de sustentação das esquadrias no <i>United Nations Secretariat</i>	12
Figura 1.7: Vista geral do edifício <i>Alcoa Building</i> em <i>Pittsburg</i>	14
Figura 1.8: Detalhe do içamento dos painéis de alumínio do <i>Alcoa Building</i>	15
Figura 1.9: Vista geral da estrutura de cobertura do hospital <i>Radeliffe</i> em <i>Oxford</i>	15
Figura 1.10: Vista geral da Cúpula do Descobrimento	16
Figura 1.11: Detalhe da ligação dos seis arcos principais em alumínio da Cúpula do Descobrimento	17
Figura 1.12: Detalhe de fabricação dos arcos de alumínio formando a seção transversal do triângulo invertido	17
Figura 1.13: Edifício pré-fabricado em alumínio do tipo treliçado	18
Figura 1.14: Edifício pré-fabricado em alumínio com vigas e pilares em perfis extrudados de alma cheia	19
Figura 1.15: Estrutura do hangar do aeroporto de Londres	19
Figura 1.16: Detalhe dos aparelhos de apoio em aço para os pilares em alumínio dos pórticos dos hangares do aeroporto de Londres	20
Figura 1.17: Vista geral da Casa da Austrália no Jardim Botânico de <i>Kew</i>	21
Figura 1.18: Içamento da estrutura	22

Figura 1.19: Disposição dos pilares	22
Figura 1.20: Estrutura espacial do <i>River Shopping Petrolina</i>	23
Figura 2.1: Curva de flambagem (método da traçagem)	30
Figura 2.2: Curva de flambagem para liga 6351(têmperas T4 e T6)	31
Figura 2.2: Curva de flambagem para liga 6061(têmperas T5 e T6)	32
Figura 2.2: Comparação entre as curvas tensão x deformação para o aço A36 e a liga de alumínio 6061-T6	34
Figura 3.1: Chapa sob carregamento centrado e uma linha de parafusos	47
Figura 3.2: Chapa com furos em zig-zag	48
Figura 3.3: Chapa com ligação excêntrica	49
Figura 3.4: Cantoneira simples ligada por apenas uma das abas	50
Figura 3.5: Perfil U conectado pela alma	50
Figura 4.1: Modos de falha por flambagem global	57
Figura 4.2: Diagrama tensão x deformação: ilustração do módulo tangente	58
Figura 4.3: Comparação entre as curvas tensão x deformação para as ligas envelhecidas artificialmente e as ligas não envelhecidas artificialmente	60
Figura 4.4: Reta de flambagem inelástica	61
Figura 4.5: Curva de flambagem para barras de alumínio	61
Figura 4.6: Curva de flambagem para a liga 6351 nas têmperas T4 e T6	65
Figura 4.7: Curva de flambagem para a liga 6351 na têmpera T6 e aço ASTM-A36	66
Figura 4.8: Casos de vinculações de chapas	71
Figura 4.9: Casos de flambagem local em chapas	72
Figura 4.10: Determinação da largura efetiva dos elementos segundo AISC e AA	76
Figura 4.11: Curva de flambagem local para elemento na liga 6061-T6, no caso de uma chapa com uma das bordas livre	78
Figura 4.12: Perfil U com mesas enrijecidas por enrijecedor de borda	79

Figura 4.13: Perfil U enrijecido disponível comercialmente, no exemplo	81
Figura 4.14: Curva de flambagem local, em tensões admissíveis, para tubos de seção circular - Liga 6061-T6	85
Figura 5.1: Distribuição das deformações e tensões na flexão	88
Figura 5.2: Flambagem lateral com torção em viga de seção I	91
Figura 5.3: Flambagem lateral em vigas	92
Figura 5.4: Viga simplesmente apoiada com momento fletor constante	94
Figura 5.5: Viga referente aos resultados da tabela 5.4	98
Figura 5.6: Curva de flambagem na flexão (FLT), em termos de tensões admissíveis, para a liga 6061-T6. Aplicável a perfis I e U fletidos em relação ao eixo de maior inércia	100
Figura 5.7: Curvas de flambagem local para a liga 6061-T6	101
Figura 5.8: Mesa fictícia para o cálculo da tensão admissível à flambagem local de vigas, pelo método das médias ponderadas	102
Figura 5.9: Enrugamento da alma de uma viga de seção I	104
Figura 5.10: Estado combinado de tensões para o enrugamento e flexão na alma de uma viga	106
Figura 5.11: Curvas de flambagem para cisalhamento - liga 6061-T6	108
Figura 5.12: Dimensões a_1 e a_2 para cálculo da dimensão efetiva a_e	109
Figura 6.1: Efeito de segunda ordem na flexão composta	112
Figura 7.1: Rebite tradicional	119
Figura 7.2: Espaçamento mínimo entre rebites e entre rebites e borda	120
Figura 7.3: Parafuso <i>lockbolt</i>	123
Figura 7.4: Parafusos auto-atarraxantes	124
Figura 7.5: Tipos de furos para parafusos	128
Figura 7.6: Rasgamento da face posterior do furo puncionado	129
Figura 7.7: Modos de falha em ligações parafusadas	130
Figura 7.8: Interação entre tração e cortante em parafusos	137
Figura 7.9: Distâncias entre furo e borda recomendado pela norma da AA	141

Figura 7.10: Modo de falha nos parafusos auto-atarraxantes	142
Figura 7.11: Exemplos de solda de topo	148
Figura 7.12: Solda de filete	149

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Propriedades físicas das ligas de alumínio empregadas em projeto	37
Tabela 2.2: Constantes físicas do alumínio puro	37
Tabela 2.3: Equivalência entre normas para especificação de ligas de alumínio	38
Tabela 2.4: Composição química de algumas ligas	39
Tabela 2.5: Identificação das ligas através de cores	40
Tabela 2.6: Características e produtos típicos de algumas ligas	41
Tabela 2.7: Propriedades mecânicas de algumas ligas	44
Tabela 3.1: Resistência admissível à tração de algumas ligas	46
Tabela 3.2: Comparação entre valores de C_1 para o cálculo da área efetiva	51
Tabela 4.1: Valores de limite de escoamento à compressão e módulo de elasticidade para a liga 6351	62
Tabela 4.2: Parâmetros para a determinação da expressão de flambagem inelástica	63
Tabela 4.3: Tensões admissíveis da flambagem (em kN/cm^2) da liga 6351 nas têmperas T4 e T6	64
Tabela 4.4: Modos de flambagem em barras sob compressão centrada	67
Tabela 4.5: Valores de k e α para alguns casos de vinculação e solicitação em chapas longas	74
Tabela 4.6: Comportamento pós-flambagem em elementos compridos segundo a AA	77
Tabela 5.1: Comparação entre os valores de tensão admissível ao escoamento na tração para diferentes seções transversais	89
Tabela 5.2: Tensão admissível para vigas de alumínio segundo a norma da AA	90
Tabela 5.3: Valores de C_b para alguns casos freqüentes	96
Tabela 5.4: Raio de giração e tensão de flambagem elástica (FLT) para a viga da figura 5.5	99

Tabela 7.1: Código de marcação de parafusos segundo a ASTM F468	.....	126
Tabela 7.2: Resistência mínima à tração e ao cisalhamento para rebites de ligas de alumínio	.....	126
Tabela 7.3: Resistências à tração e ao cisalhamento para parafusos de aço inoxidável das ligas 303, 304 e 316	.....	127
Tabela 7.4: Áreas efetivas à tração dos parafusos de aço e alumínio	.....	133
Tabela 7.5: Força cortante admissível (em kN) para parafusos de de alumínio nos diâmetros e ligas mais utilizados	.....	135
Tabela 7.6: Distâncias mínimas entre furos e entre furo e borda para parafusos de diâmetros mais empregados	.....	140
Tabela 7.7: Resistência ao cisalhamento de parafusos auto-atarraxantes: contato entre parafuso e metal base	.....	144
Tabela 7.8: Resistências ao cisalhamento para os eletrodos mais empregados	.....	146
Tabela 7.9: Resistências de algumas ligas na região da solda	.....	147
Tabela 7.10: Dimensão nominal máxima de filetes ao longo das bordas do metal base	.....	150
Tabela 7.11: Dimensão nominal mínima de filetes	.....	150

Lista de Abreviaturas e Siglas

AA	- Aluminum Association
AASHTO	- American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	- American Institute of Steel Construction
AISI	- American Iron and Steel Institute
AMS	- Aerospace Materials Specifications
ANSI	- American National Standards Institute
AS	- Aluminum Structures
ASCE	- American Society of Civil Engineers
ASD	- Aluminum Standard and Data
ASME	- American Society of Mechanical Engineers
ASTM	- American Society for Testing and Materials
AWS	- American Welding Society
BS	- British Standard
CSA	- Canadian Standards Association
FLT	- Flambagem Lateral com Torção
LRFD	- Load and Resistance Factor Design

Lista de Símbolos

α	- fator que expressa a condição de vinculação da chapa
β	- parâmetro utilizado no cálculo de flexo-torção
β	- constante utilizada no cálculo do cisalhamento sendo 1,0 para forças fora da extremidade da viga e 1,2 para forças na extremidade da viga
ϕ	- ângulo de rotação
γ	- parâmetro utilizado no cálculo de flexo-torção
λ	- índice de esbeltez
λ_ϕ	- índice de esbeltez equivalente para flambagem por torção
λ_{FT}	- índice de esbeltez para flambagem por flexo-torção
$\bar{\lambda}_{eq}$	- índice de esbeltez equivalente para flambagem por flexo-torção
λ_{pl}	- índice de esbeltez na plastificação
ν	- coeficiente de Poisson
σ	- menor tensão de tração em serviço
σ_a	- tensão normal admissível
σ_{a0}	- tensão admissível à compressão centrada desconsiderando a flambagem global
σ_{aN}	- tensão admissível à compressão centrada
σ_{as}	- tensão admissível à flambagem local do elemento com enrijecedor de borda
$\sigma_{a,r}$	- tensão admissível reduzida
σ_{ax}	- tensão admissível à flexão em relação ao eixo principal x
σ_{ay}	- tensão admissível à flexão em relação ao eixo principal y

σ_c	- tensão crítica na compressão
σ_{ca}	- tensão admissível média à flambagem local
σ_{cg}	- tensão crítica de flambagem global
σ_{ci}	- tensão admissível à flambagem local para o elemento i
σ_{cl}	- tensão crítica de flambagem local
σ_{cr}	- tensão crítica de flambagem local elástica
σ_{FT}	- tensão crítica de flambagem por flexo-torção
σ_e	- tensão crítica de Euler
σ_{ex}	- tensão crítica de flambagem elástica por flexão em torno do eixo x
σ_{ey}	- tensão crítica de flambagem elástica por flexão em torno do eixo y
σ_{Mx}	- tensão de compressão máxima devida à flexão em relação ao eixo principal x
σ_{My}	- tensão de compressão máxima devida à flexão em relação ao eixo principal y
σ_N	- tensão de compressão proveniente da força normal
σ_{sT}	- tensão admissível à flambagem local admitindo o elemento apoiado em ambas as bordas
σ_t	- tensão crítica de flambagem elástica por torção
σ_{uT}	- tensão admissível à flambagem local admitindo o elemento apoiado com borda livre
τ_a	- tensão de cisalhamento admissível
τ	- tensão de cisalhamento
$(FS)_u$	- fator de segurança na ruptura, igual a 1,95
$(FS)_y$	- fator de segurança no escoamento, igual a 1,65
a	- parâmetro para determinação da expressão da flambagem

	inelástica
a_e	- dimensão efetiva em almas com enrijecedores
a_1	- dimensão para o cálculo da dimensão efetiva em almas com enrijecedores
a_2	- dimensão para o cálculo da dimensão efetiva em almas com enrijecedores
A	- área da seção transversal
A_e	- área líquida efetiva da seção transversal
A_f	- área líquida do elemento conectado
A_i	- área do elemento i
A_l	- área líquida do elemento não conectado
A_p	- área bruta nominal em parafusos
A_r	- área efetiva à tração em parafusos
A_w	- área da alma
b	- largura da chapa ou soma das larguras das mesas e almas
b/t	- relação largura-espessura
B_c	- parâmetro para determinação da expressão da flambagem inelástica
B_p	- parâmetro para determinação da expressão da flambagem inelástica na flambagem local
C_b	- coeficiente de equivalência de momentos na flexão
C_c	- parâmetro para determinação da expressão da flambagem inelástica
C_{mx}	- coeficiente de equivalência de momentos na flexão composta em relação ao eixo principal x
C_{my}	- coeficiente de equivalência de momentos na flexão composta em relação ao eixo principal y
C_w	- constante de empenamento

-
- C_1 - índice de esbeltez limite entre escoamento e flambagem inelástica
- C_2 - índice de esbeltez limite entre flambagem inelástica e flambagem elástica
- d - diâmetro nominal do parafuso
- d - comprimento da barra
- d_h - diâmetro furo
- d_{ws} - maior valor entre o diâmetro da cabeça do parafuso ou o diâmetro da arruela
- D_c - parâmetro para determinação da expressão da flambagem inelástica
- D_p - parâmetro para determinação da expressão da flambagem inelástica na flambagem local
- e - excentricidade da força em relação ao centróide da seção
- E - módulo de elasticidade longitudinal
- E_c - módulo de elasticidade na compressão
- E_t - módulo de elasticidade na tração
- E_t - módulo tangente
- f_{bu} - resistência à ruptura por esmagamento
- f_{bu1} - resistência à ruptura por esmagamento do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso
- f_{bu2} - resistência à ruptura por esmagamento do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso
- f_{by} - resistência ao escoamento por esmagamento
- f_{by1} - resistência ao escoamento por esmagamento do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso
- f_{by2} - resistência ao escoamento por esmagamento do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso

f_{cy}	- resistência ao escoamento na compressão
f_{su}	- resistência à ruptura por cisalhamento
f_{suw}	- resistência à ruptura do metal base
f_{tu}	- resistência à ruptura na tração
f_{tu1}	- resistência à tração do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso
f_{tu2}	- resistência à tração da chapa que não está em contato com a cabeça do parafuso
f_{tuw}	- resistência à tração do metal base na região da solda
f_{ty}	- resistência ao escoamento na tração
f_{tyw}	- resistência ao escoamento do metal base na região da solda
f_{ut}	- resistência à tração do parafuso
f_y	- resistência ao escoamento do aço
F	- força cortante na seção analisada
F_a	- força concentrada (ou reação de apoio) admissível
g	- distância entre os centros dos furos, perpendicular à direção da solicitação
G	- módulo de deformação transversal
h	- altura da alma descontadas as mesas
I_s	- momento de inércia do enrijecedor
I_t	- momento de inércia à torção ou constante de St. Venant
I_x	- momento de inércia em relação ao eixo x
I_y	- momento de inércia em relação ao eixo y
k_ϕ	- coeficiente para cálculo do comprimento efetivo à torção da barra
k	- parâmetro relacionado a condição de vinculação de um elemento
k	- coeficiente de flambagem de chapa

k_2	- constante empregada no comportamento pós-flambagem para cada liga
k_c	- coeficiente de modificação do fator de segurança
k_L	- comprimento efetivo de flambagem
k_t	- coeficiente de modificação do fator de segurança, empregado em algumas ligas
k_v	- coeficiente de flambagem de chapa em almas (AISC)
K_y	- coeficiente do comprimento efetivo para a mesa comprimida ao eixo de menor inércia
L	- comprimento livre da barra à torção
L_b	- distância entre dois pontos da viga travados lateralmente
M	- momento fletor na viga
M_a	- momento fletor admissível, calculado para a flexão isoladamente
M_c	- momento de flambagem elástica
$M_{máx}$	- valor absoluto do máximo momento no trecho analisado
M_A	- valor absoluto do momento no primeiro quarto do trecho analisado
M_B	- valor absoluto do momento no ponto médio do trecho analisado
M_C	- valor absoluto do momento no terceiro quarto do trecho analisado
M_1	- menor momento ao longo da viga
M_2	- maior momento ao longo da viga
n	- número de furos na seção analisada
n	- número de fios de rosca
r	- raio de giração
r_s	- raio de giração do enrijecedor em relação à linha esqueleto do

	elemento a ser enrijecido
r_x	- raio de giração em relação ao eixo principal x
r_y	- raio de giração em relação ao eixo principal y
r_{ye}	- raio efetivo de giração, utilizado no lugar de r_y
r_0	- raio polar de giração da seção transversal em relação ao centro de torção
R	- parâmetro que depende da rigidez do enrijecedor de borda e da esbeltez do elemento a ser enrijecido
R_{out}	- resistência ao arrancamento (<i>pull-out</i>)
R_{over}	- resistência ao arrancamento (<i>pull-over</i>)
R_{st}	- resistência à tração do próprio parafuso
R_{sv}	- resistência ao cisalhamento do próprio parafuso
R_{su1}	- resistência ao cisalhamento com ruptura do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso
R_{su2}	- resistência ao cisalhamento com ruptura do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso
R_{sy1}	- resistência ao cisalhamento com escoamento do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso
R_{sy2}	- resistência ao cisalhamento com escoamento do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso
R_{til}	- resistência ao cisalhamento com inclinação excessiva do parafuso (<i>tiltting</i>)
R_w	- resistência admissível da solda (solda de filete)
R_{MB}	- resistência admissível do metal base na face de fusão
s	- distância entre os centros dos furos, paralela à direção da solicitação
t	- espessura da chapa ou parede do tubo

-
- t_1 - espessura do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso
- t_2 - espessura do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso
- t_c - comprimento da rosca atarraxado ao elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso
- t_w - espessura da alma
- u - deslocamento do centro de torção na direção do eixo y
- v - deslocamento do centro de torção na direção do eixo x
- V - força cortante na seção
- W_c - módulo de resistência elástico em relação à fibra mais comprimida
- x_0 - distância entre o centróide e o centro de torção na direção do eixo principal x
- y_0 - distância entre o centróide e o centro de torção na direção do eixo principal y

Resumo

BUZINELLI, D. V. (2000). *Dimensionamento de elementos estruturais em alumínio*. São Carlos, 2000. 160p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O alumínio, ou mais precisamente as ligas de alumínio, vem ganhando significativo espaço no mercado das construções metálicas, com aplicação nas estruturas e em componentes como telhas e painéis em geral. Características como a leveza, boa trabalhabilidade, elevada resistência mecânica e à corrosão colocam as estruturas de alumínio como vantajosas em relação às estruturas de aço em muitas situações. Enfatizando as características do material e o projeto estrutural, são apresentadas as ligas de alumínio, suas características e produtos disponíveis, e os fundamentos teóricos que constituem a base do dimensionamento das barras e das ligações. Com a ausência de norma brasileira para projeto de estruturas de alumínio, são apresentados e discutidos os requisitos da norma americana da *Aluminum Association* e as recomendações das usinas produtoras.

Palavras-chave: estruturas metálicas, estruturas de alumínio; alumínio; dimensionamento.

Abstract

BUZINELLI, D. V. (2000). *Design of structural elements in aluminum*. São Carlos, 2000. 160p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Aluminum or, more specifically, aluminum alloys, have been gaining a significant niche in the market of metal constructions, with applications in structures and in components such as roof tiles and panel in general. Characteristics such as workability, and high mechanical and corrosion resistance have placed aluminum structures in an advantageous position in relation to steel structures in many situations. Emphasizing characteristics of the material and structural design, this work discusses aluminum alloys, their characteristics and the products available, as well as the theoretical fundamentals that serve as the basis for the design of members and connections. Lacking a Brazilian code for the design of aluminum structures, the requirements of American code of the Aluminum Association and the recommendations of the manufactures are present and discussed.

Key words: metal structures; aluminum structures; aluminum; aluminum design.

1. Introdução

1.1. Obtenção e Aspectos Gerais

O setor de produção de alumínio, um dos mais versáteis metais utilizados pelo homem, é hoje a segunda indústria metalúrgica do mundo, superada apenas pela siderurgia. O alumínio é um metal que apresenta vasta gama de aplicação pois apresenta elevada resistência mecânica e à corrosão, possuindo excelente aspecto estético.

Extraído da bauxita, o alumínio é um metal formado a partir da decomposição de rochas alcalinas dada pela infiltração de água. O processo de produção do alumínio dá-se por uma série de reações químicas.

A bauxita encontra-se próxima a superfície (em média 4,5 metros de profundidade) sendo minerada e transportada para a fábrica com impurezas que necessitam ser eliminadas. É moída e misturada a uma solução de soda cáustica que a transforma em uma pasta que sob pressão se dissolve passando por processo de sedimentação e filtragem que eliminam todas as impurezas, a fim de que possa ser extraída a alumina.

A alumina é um pó branco e refinado semelhante ao açúcar, sendo que a alumina primeiramente obtida tem bastante quantidade de água e recebe a denominação de alumina hidratada.

Por meio de diferentes processos a alumina pode resultar em alumina calcinada, alumina tabular ou cimento de aluminato de cálcio, com diferentes aplicações.

Na definição técnica esta produção dá-se por um processo de redução eletrolítica que separa oxigênio presente na alumina. O metal adquire a consistência líquida e quente, sendo transportado para fornos onde é misturado a outros metais para adquirir propriedades específicas de acordo com o tipo de utilização a que se destina. São nestes fornos que ocorre a purificação do metal com a retirada de impurezas.

Ainda em estado líquido, o alumínio é colocado em moldes e resfriado até se solidificar em lingotes. Já solidificados e resfriados, os lingotes de alumínio estão prontos para serem transformados em diversos produtos, por meio de processos como a extrusão, a laminação, a fundição ou a trefilação.

A figura 1.1, extraída do manual da ALCOA, ilustra esquematicamente o processo de produção de alumínio primário.

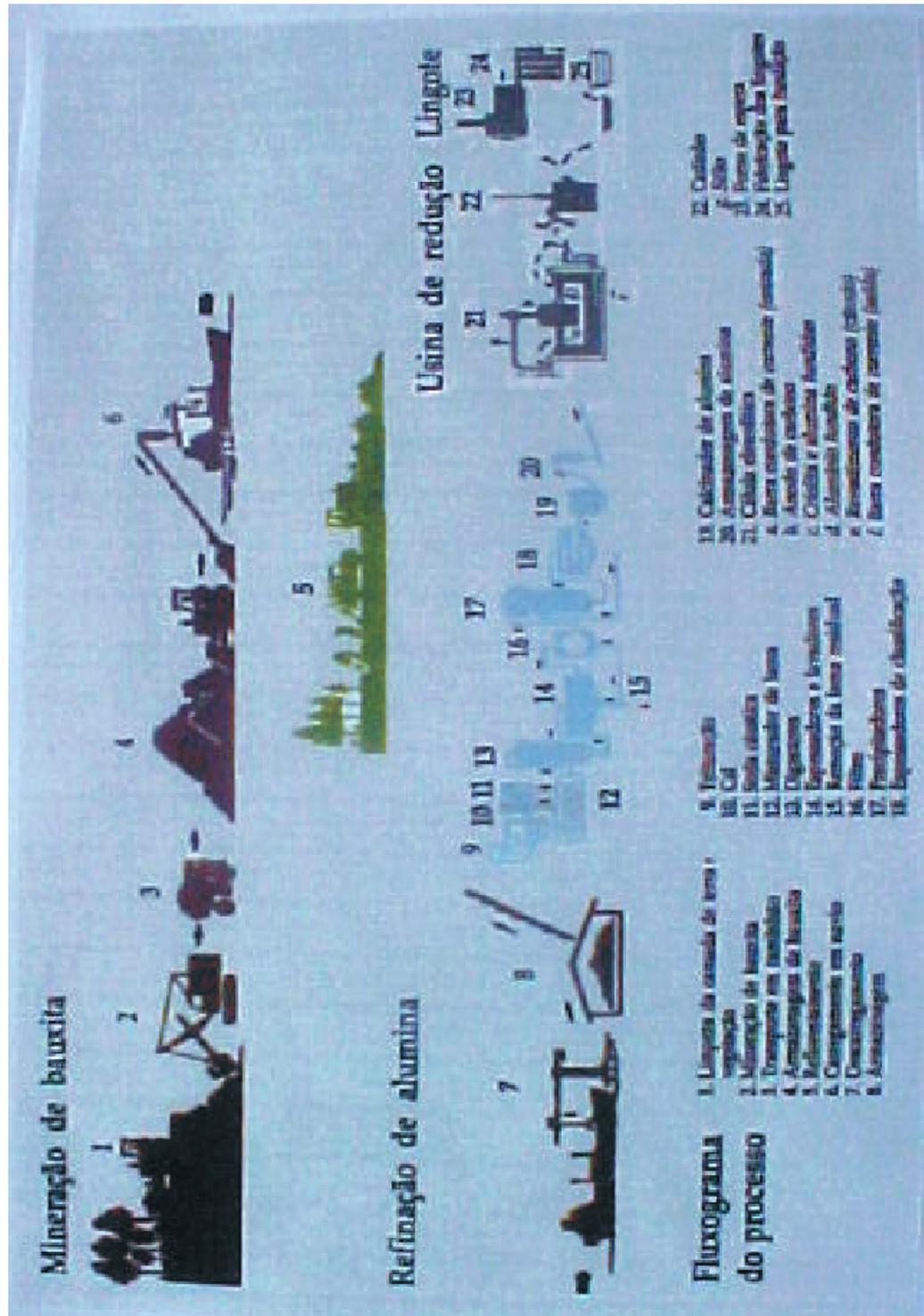


Figura 1.1: Fluxograma do processo de produção do alumínio primário [extraída do MANUAL DA ALCOA (1997)].

A fundição consiste basicamente no aquecimento do metal sólido até seu ponto de fusão, vazamento em formas previamente preparadas e solidificação, obtendo-se assim a forma desejada. Este é um dos mais importantes processos de transformação do alumínio (figura 1.2).

O processo de fusão do alumínio inicia-se com o recebimento do alumínio primário em lingotes e a preparação de ligas de fundição adequadas a cada produto, de acordo com a sua futura utilização.

A preparação das ligas em geral é feita em de centrais de fusão compostas por fornos elétricos. A partir destes fornos o alumínio passará, dependendo das características desejadas, por três processos de fundição. Um de injeção sob alta pressão e dois por gravidade: coquilha e areia.

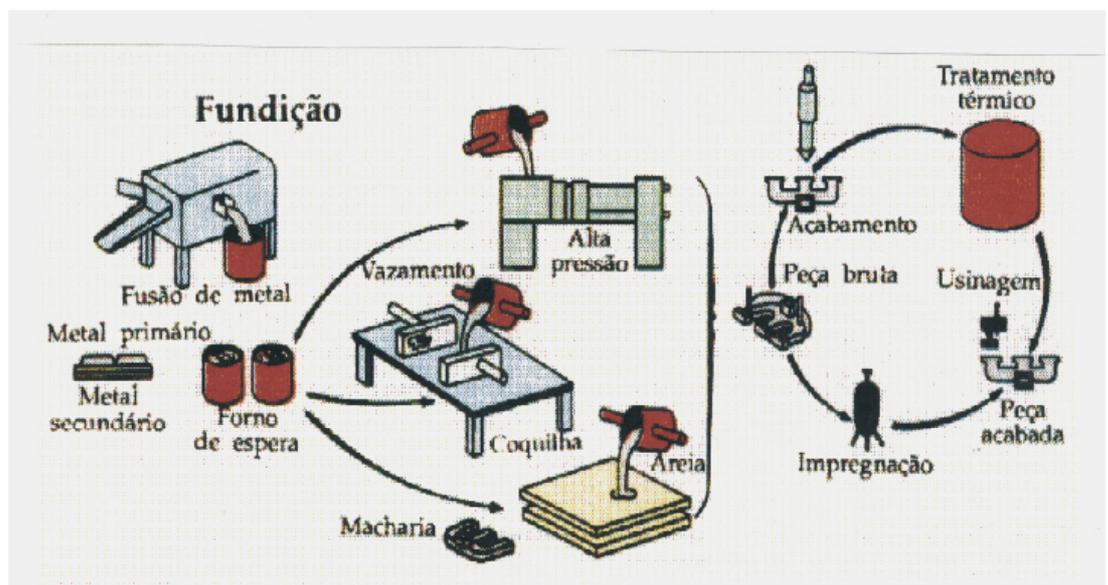


Figura 1.2: Fluxograma da fundição do alumínio [extraída do MANUAL DA ALCOA (1997)].

Todas as peças fundidas pelos processos de injeção sob pressão ou por gravidade podem ser fornecidas já usinadas com todos os faceamentos, roscas, furos, frezamentos ou rebaixos necessários a sua utilização nas linhas de montagem ou fabricação a que se destinam.

Outro processo de produção de peças de alumínio é a extrusão, sendo muito utilizado na produção de perfis estruturais com variadas seções transversais. Na extrusão, o metal pastoso passa por um orifício chamado de matriz atingindo a forma alongada de perfis, através de diferentes passos e cuidados.

Este processo exige que os tarugos de alumínio sejam primeiramente submetidos a um tratamento térmico. Levados, em fornos, a uma temperatura de 600 °C, os tarugos se dilatam e os cristais que os compõem ficam dispersos em toda a sua extensão, facilitando a extrusão e impedindo que a matriz, a ser utilizada, se danifique.

Depois dessa homogenização os tarugos são serrados e novamente aquecidos antes de serem levados até a prensa de extrusão. Após passar pela prensa de extrusão os perfis são ainda esticados e serrados nas medidas padrões de comercialização.

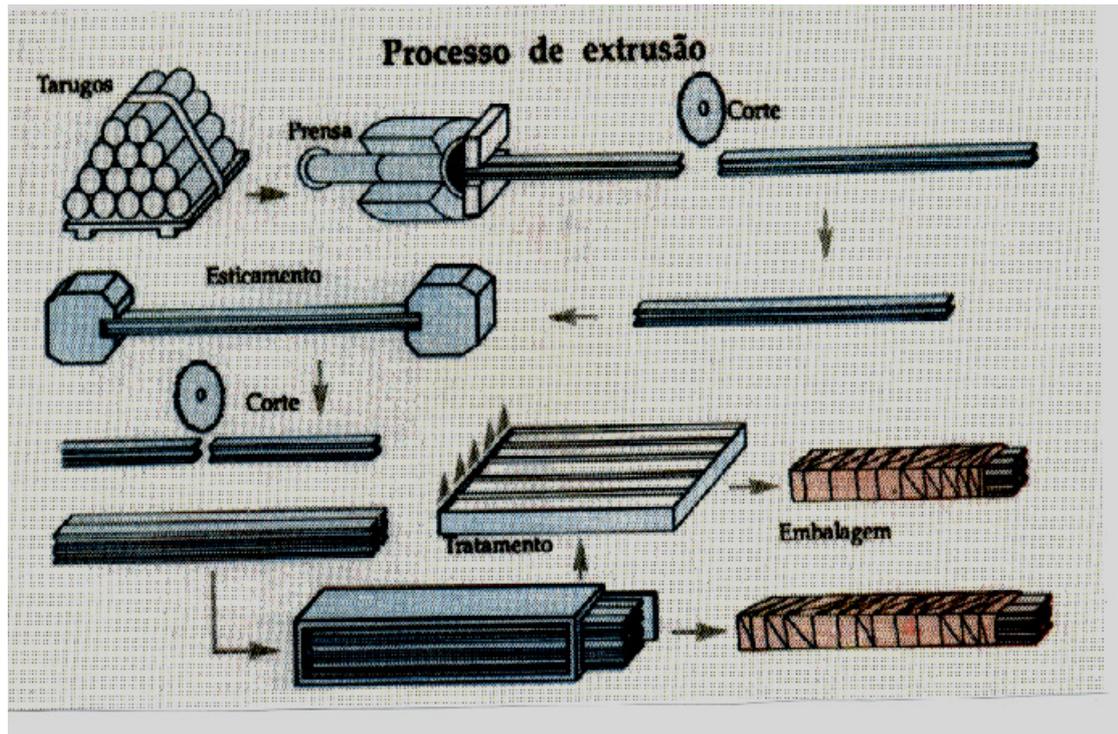


Figura 1.3: Fluxograma do processo de extrusão de perfis de alumínio [extraída do MANUAL DA ALCOA (1997)].

Os lingotes de alumínio primário também podem passar pelo processo de laminação de peças. Este processo inicia-se com a refusão dos lingotes em quatro fornos. Já fundido, o metal passa por uma análise de sua composição química e pelo processo de eliminação de impurezas e gases provenientes da fusão, desta forma o alumínio está pronto para ser transformado em lâminas, geralmente chapas com variadas aplicações, destacando-se a utilização em telhas e a fabricação de perfis formados a frio.

As chapas pintadas ou envernizadas, empregadas para a fabricação de telhas, ou elementos de forros, passam ainda por um banho químico eliminando graxas e óleos antes da aplicação da tinta. Depois de pintada a chapa é levada a uma estufa onde a tinta adquire elevada resistência, o que permite que a chapa seja trabalhada a frio sem que a tinta se rompa ou sofra algum dano.

O processo de laminação pode ser novamente aplicado para a obtenção de folhas de alumínio com espessuras menores que 0,3 mm, chegando a espessura de 0,02 mm.

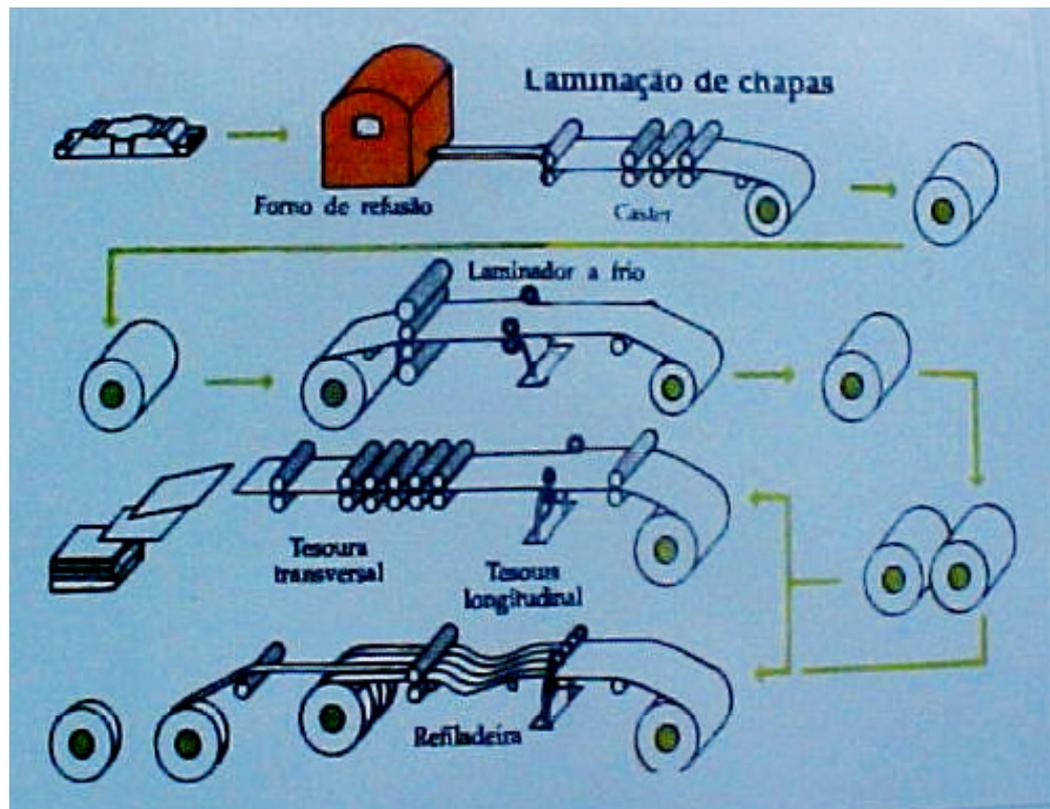


Figura 1.4: Fluxograma da laminação de chapas de alumínio [extraída do MANUAL DA ALCOA (1997)].

O processo de trefilação é utilizado basicamente na produção de cabos e fios de alumínio para a transmissão de energia elétrica, que envolve também o processo de encordamento e isolamento destes.

O Brasil é o sexto maior produtor mundial de alumínio primário e detentor da terceira maior reserva de bauxita. Em 1994 produziu 1.185.000 toneladas de alumínio primário, sendo também exportador de lingotes, chapas,

extrudados, fundidos, fios e cabos, alinhando-se com os maiores produtores mundiais. Segundo a publicação da revista “Veja” (05/01/2000) a fábrica de alumínio da ALBRAS teve a maior produtividade mundial com 342.000 toneladas de lingotes de alumínio em Bacarema, Pará.

Com relação ao panorama do mercado mundial, os seis maiores produtores de alumínio primário detêm aproximadamente 50% deste mercado, sendo eles ALCOA (USA), ALCAN (Canadá), KAYSER (Alemanha), REYNOLDS, ALUISSUISSE (Suíça) e PECHINEY.

O custo energético da produção de alumínio é fator dominante no processo de produção do metal. Este fato determina a fixação das indústrias produtoras em países do terceiro mundo, onde é possível obter-se redução nestes custos se comparados com os obtidos em países mais desenvolvidos.

Os patamares de US\$1.000 a US\$1.200 para o custo da tonelada de alumínio primário é tido por alguns analistas como uma tendência, deteriorando, de certa forma, a lucratividade dos produtores, segundo METALURGIA & MATERIAIS de julho de 1995.

MASCARIN & DIFFENBACH (1993) afirmam que um estudo econômico concluiu atualmente, que o aço é economicamente mais competitivo para as produções em grande escala, enquanto que para produções em médias e pequenas escalas o alumínio já é mais competitivo.

Entretanto os estudos desenvolvidos no Brasil, na área de estruturas metálicas, têm-se limitado às estruturas de aço, deixando a um segundo plano o alumínio enquanto material estrutural.

A literatura nacional sobre o assunto restringe-se basicamente à catálogos e manuais das usinas produtoras. A ausência de normalização que regulamente o assunto implica na utilização de normas estrangeiras, muitas vezes de maneira aleatória.

O campo de aplicação das estruturas de alumínio é praticamente o mesmo das estruturas de aço, sendo a utilização de estruturas de alumínio principalmente pesquisada em função da redução de peso (a densidade do

alumínio corresponde a um terço da densidade do aço) ou de condições ambientais agressivas.

O alumínio também tem grande aplicabilidade em estruturas sujeitas a ações dinâmicas, em estruturas móveis e naquelas estruturas onde o seu peso próprio corresponde a grande parte do carregamento total. Merecem destaque as estruturas espaciais, que fazem do alumínio juntamente com a concepção estrutural e arquitetônica, um conjunto extremamente viável. Segundo ABDO (1993), as estruturas de alumínio, em comparação com as estruturas de aço, apresentam reduções no peso de 40% a 70%. Desta forma, admitindo-se estruturas mais leves e com custos de manutenção mais baixos, as estruturas de alumínio podem, em certos casos, apresentar custos globais inferiores aos das estruturas de aço correspondentes.

Estes fatores não estão sendo adequadamente considerados em muitas decisões sobre a escolha do material estrutural a ser empregado, o que pode determinar, aliado a escassez de informações técnicas, as poucas aplicações das estruturas em alumínio no país.

A economia associada ao custo de manutenção para a qual o alumínio apresenta vantagens em função de sua grande resistência à corrosão, faz deste um material adequado para ambientes corrosivos. A camada superficial do metal ao oxidar-se passa a apresentar propriedades oclusivas dando proteção às camadas mais internas do metal. Esta característica reduz a necessidade de tratamento das superfícies através de pintura e diminui sensivelmente os custos com manutenção. Em alguns ambientes industriais a oxidação superficial das estruturas em alumínio pode apresentar a cor cinza opaca, entretanto o produto de sua corrosão é atóxico, podendo ser utilizado mesmo em indústrias químicas e de alimentos.

O alumínio apresenta baixo módulo de elasticidade, se comparado com o aço, correspondendo a um terço do valor do aço. Este fator faz com que as estruturas em alumínio apresentem uma satisfatória resposta sob o efeito de tensões oriundas de impactos, deformações e ajustes. Em contrapartida, o

baixo módulo de elasticidade determina a necessidade de uma cuidadosa avaliação da rigidez dos elementos e da estrutura globalmente.

O coeficiente de dilatação térmica do alumínio corresponde ao dobro do valor para o aço, entretanto em função do baixo módulo de elasticidade, as tensões provenientes das variações de temperatura em geral não alcançam valores significativos. A alta condutividade térmica do alumínio pode ainda melhorar esta condição em elementos sujeitos a pontos de chamas concentrados.

Em baixas temperaturas as estruturas em alumínio não estão sujeitas a ruptura frágil, por outro lado o alumínio pode ser usado em temperaturas de até 250 °C, merecendo modificações no projeto as estruturas sujeitas a uma temperatura maior que 100 °C, segundo MARSH (1983).

Outra vantagem fundamental dos elementos estruturais em alumínio está no processo de fabricação de perfis através do processo de extrusão. Este processo permite a fabricação de perfis com diversas seções transversais, oferecendo facilidade de montagem, maior eficiência estrutural pela melhor distribuição de massa e melhorias de aparência estética.

Para o projetista, este processo de fabricação de perfis permite maior liberdade para o dimensionamento, com a utilização de um maior número possível de seções transversais.

O alumínio pode ser ainda forjado, usinado, cortado, estampado, furado e soldado, conferindo-lhe maior trabalhabilidade. Em determinadas ligas, é um material soldável e para a viabilidade econômica das estruturas soldadas em alumínio faz-se necessário o aumento das velocidades de soldagem, bem menores se comparadas com as correspondentes em estruturas de aço. O preparo das superfícies de alumínio também encarece o processo.

Com relação aos processos de acabamento o alumínio está sujeito a vários tipos de tratamento, cuja principal finalidade é estética, como pinturas, texturas mecânicas, esmaltação, tratamento químico e tratamento eletroquímico.

O alumínio não é um metal magnético, mas apresenta grande condutividade elétrica. Numa comparação de pesos equivalentes o alumínio possui condutividade elétrica aproximadamente igual ao dobro da do cobre.

Estas propriedades reforçam as afirmações de autores como BRIDENBAUGH (1987), presidente do setor de pesquisas da *Aluminium Company of America, Alcoa Center*, que destaca o alumínio e as ligas estruturais de alumínio como o material estrutural para o futuro, com base em questões ambientais como poluição, reciclagem, oferta de produto e possibilidades de melhoria da qualidade para atender o mercado.

1.2. Algumas estruturas em alumínio

As estruturas em alumínio são recentes no Brasil e até mesmo no contexto internacional. Em países como os Estados Unidos o maior segmento de estruturas em alumínio está nos painéis estruturais para indústria.

Barras verticais e horizontais extrudadas em alumínio são os elementos estruturais dos painéis, sendo estas usadas também nos quadros que sustentarão janelas e portas nos painéis com abertura.

Pode-se destacar a utilização de painéis de alumínio nos Estados Unidos nos edifícios da *United Nations Secretariat* em Nova Iorque e *Alcoa Building* em Pittsburg.

O edifício *United Nations Secretariat* que foi construído em 1949, é comparado a uma grande caixa pela sua forma que atinge 165,8 m de altura, 87,5 m de frente e 21,9 m de profundidade. As faces leste e oeste formam duas fachadas paralelas de vidro e alumínio e as outras duas não possuem aberturas e são revestidas por placas de mármore.

A estrutura de alumínio foi pré-fabricada em painéis de 1.215 mm de largura e 3.657 mm de comprimento composto com vidro aramado. Foram utilizados 39 tipos diferentes de perfis extrudados de alumínio na construção das duas fachadas.



Figura 1.5: Vista geral do edifício *United Nations Secretariat* em Nova Iorque.

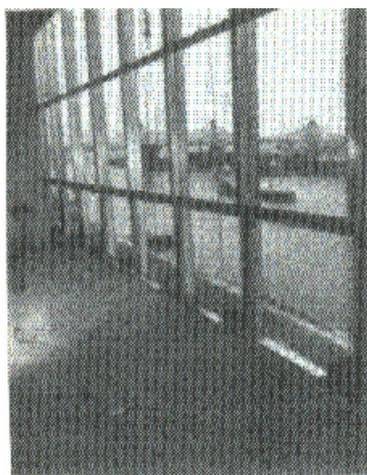


Figura 1.6: Detalhe dos painéis de sustentação das esquadrias no edifício *United Nations Secretariat*.

O edifício Alcoa em Pittsburg, Pensilvânia, é um prédio de escritórios com 30 andares e 125 m de altura. A execução de seu fechamento foi considerada, para a época de sua construção (1952), como uma técnica avançada, a medida que o edifício teve todo o seu revestimento externo em painéis de alumínio.

Seu revestimento exterior consiste de painéis de 1.829 mm por 3.658 mm. As chapas de alumínio tem espessura de 3,17 mm e a liga utilizada possui 5 % de silício com tratamento eletroquímico. As aberturas nos painéis para posicionamento de janelas são mínimas se comparadas com as dos painéis utilizados no edifício *United Nations Secretariat*.

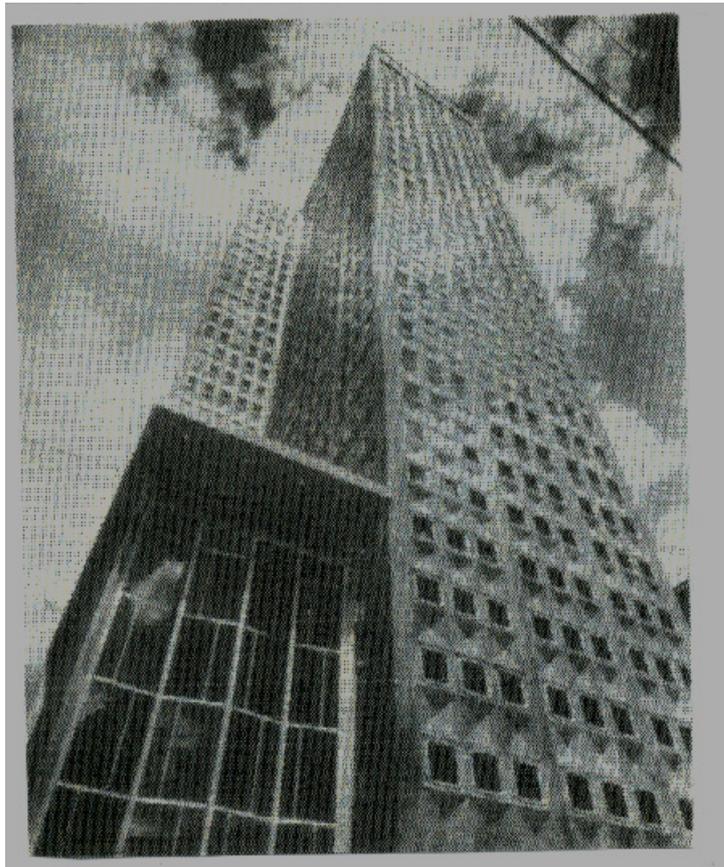


Figura 1.7: Vista geral do edifício *Alcoa Building* em Pittsburg.

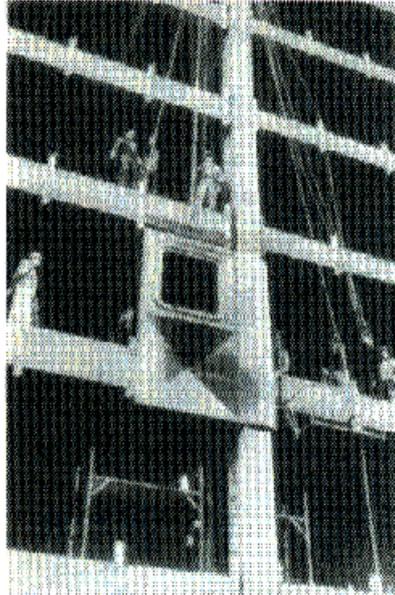


Figura 1.8: Detalhe do içamento dos painéis de alumínio *do Alcoa Building*.

Na cúpula de entrada do *Walt Disney World's Epcot Center* na Flórida, foram utilizados também painéis de cobertura.

Uma das maiores aplicações do alumínio em estruturas está na construção de coberturas, como por exemplo a estrutura de cobertura do *Hospital Radcliffe* em Oxford (figura 1.9).

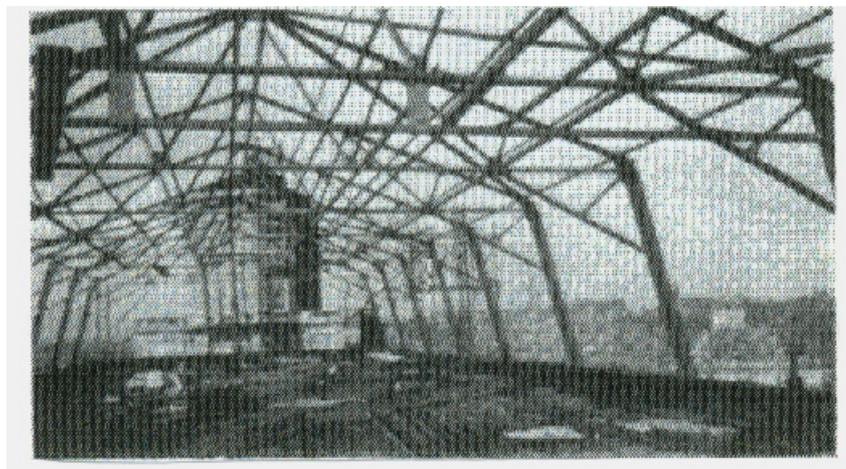


Figura 1.9: Vista geral da estrutura de cobertura do *Hospital Radcliffe* em *Oxford*.

A Cúpula do Descobrimento construída na Inglaterra para o Festival Britânico de 1951, foi até o momento de sua montagem a maior cobertura em alumínio existente, sendo o seu projeto considerado arrojado para a época (figura 1.10).

O projeto constituiu-se de uma cúpula para a cobertura em alumínio apoiada em uma cinta circunferencial de aço. A altura da estrutura do telhado é de 27,4 m com o diâmetro total da cúpula igual a 111 m, e o consumo de alumínio igual a 232 toneladas (24 kg/m^2).

A estrutura é formada por seis arcos principais de alumínio que partem radialmente do centro da cúpula com seção transversal em forma de triângulo invertido, além de outros elementos de alumínio com função secundária. Foram utilizados perfis extrudados.

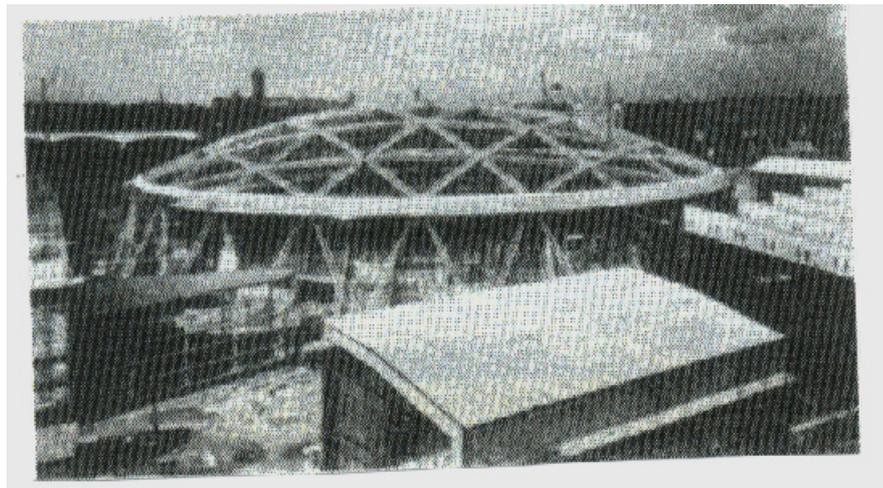


Figura 1.10: Vista geral da Cúpula do Descobrimento construída na Inglaterra.

As figuras 1.11 e 1.12 trazem mais detalhes desta estrutura.

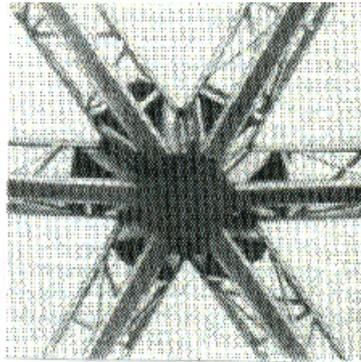


Figura 1.11: Detalhe da ligação dos seis arcos principais em alumínio da Cúpula do Descobrimento.

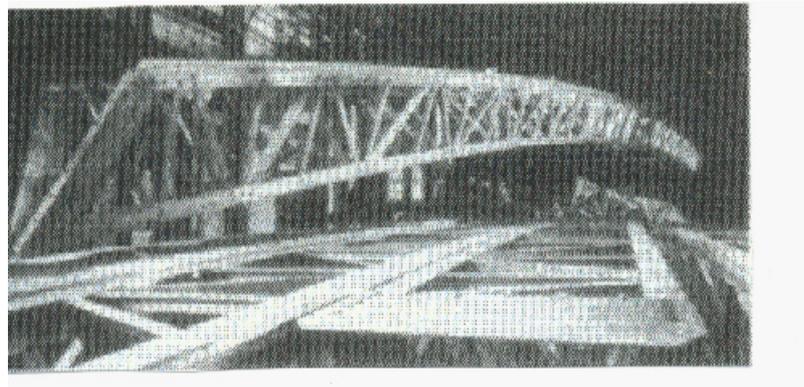


Figura 1.12: Detalhe da fabricação dos arcos de alumínio formando a seção transversal de triângulo invertido.

Destaca-se ainda, também em Pittsburg, a ponte *Smithfield Street Bridge*, que foi recuperada com a colocação de novo tabuleiro em vigas de alumínio, diminuindo o peso próprio da estrutura. Este fato ilustra a aplicação de elementos de alumínio na recuperação de pontes, que ao serem projetadas, inicialmente em concreto ou aço, previam uma sobrecarga de utilização menor que a necessária hoje em dia, assim a substituição dos elementos da estrutura por outros de menor peso pode aliviar significativamente as ações permanentes.

Um edifício pode ter também os pilares em alumínio, além da estrutura de cobertura e das telhas. Nestes casos, a grande vantagem do sistema é a economia com transporte das estruturas pré-fabricadas de baixo peso em comparação com as estruturas de aço ou concreto.

Um exemplo deste tipo de edifícios é o apresentado na figura 1.13, constituído por pórticos treliçados com vão de 10,9 m.

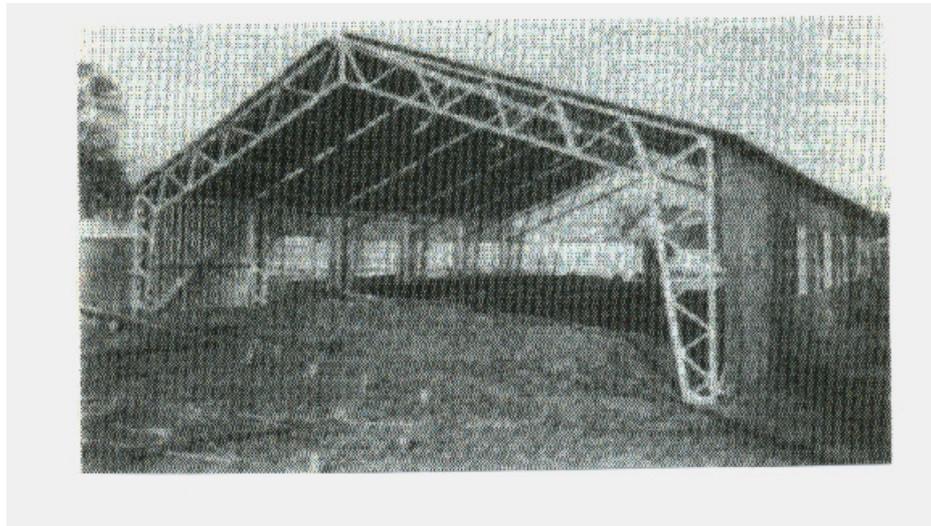


Figura 1.13: Edifício pré-fabricado em alumínio do tipo treliçado.

A estrutura da figura 1.14 também é pré-fabricada com facilidades no transporte, mas neste caso o esquema estrutural apresenta pilares e vigas de alma cheia em perfis extrudados.



Figura 1.14: Edifício pré-fabricado em alumínio com vigas e pilares em perfis extrudados de alma cheia.

Outra aplicação bastante comum para as estruturas de alumínio é a construção de hangares. A figura 1.15 ilustra um hangar do aeroporto de Londres.

Este edifício é constituído por três prédios com altura de 9,14 m e formados cada um por seis pórticos espaçados de 6,7 m.

Os apoios dos pórticos foram feitos de aço e funcionam como rótulas, aliviando as fundações (figura 1.16).

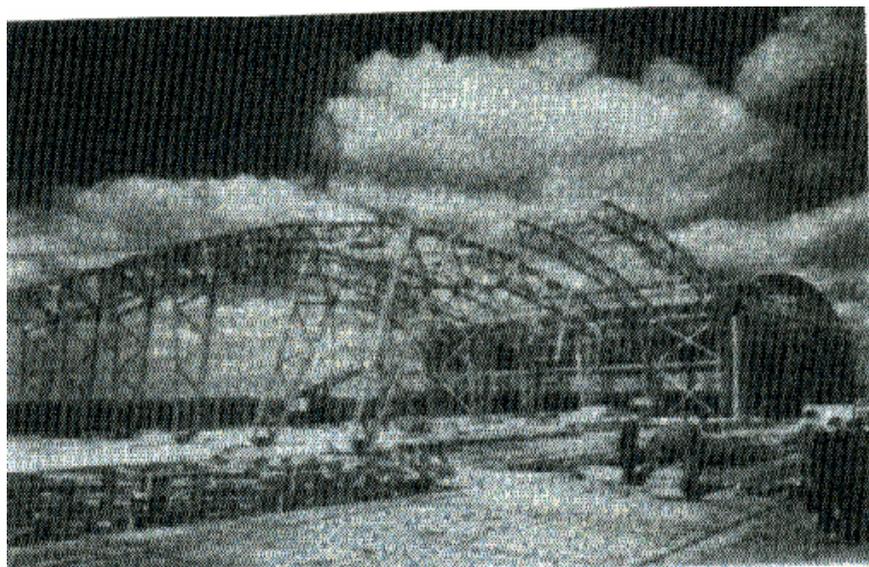


Figura 1.15: Estrutura de hangar no aeroporto de Londres.

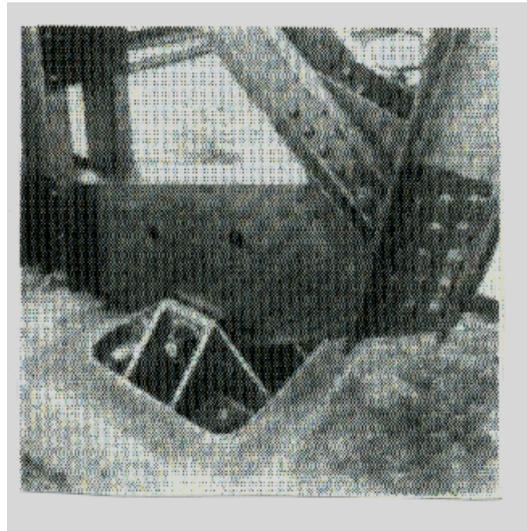


Figura 1.16: Detalhe dos aparelhos de apoio em aço para os pilares em alumínio dos pórticos dos hangares do aeroporto de Londres.

Existem também vários exemplos de aplicação para as estruturas de alumínio na construção de jardins e estufas para plantas.

A figura 1.17 ilustra este tipo de estrutura mostrando a Casa da Austrália, no Jardim Botânico Real de Kew, doada pelo governo australiano para alojar plantas do seu país.

A construção tem 27,43 m de comprimento com uma largura de 15,80 m e 10,21 m de altura, cobrindo uma superfície de 434 m². A estrutura é constituída por onze pórticos principais e o consumo de alumínio foi de 60 toneladas.

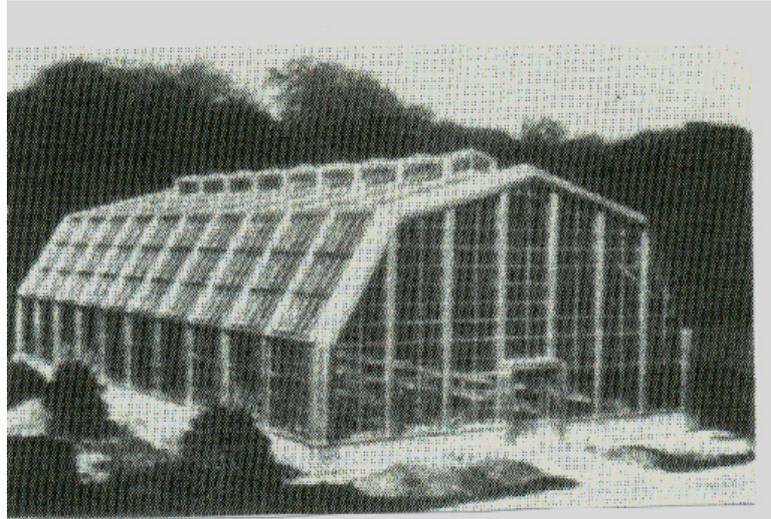


Figura 1.17: Vista geral da Casa da Austrália no Jardim Botânico de Kew.

No contexto nacional, a construção do Pavilhão Anhembi em São Paulo, que consiste na maior área coberta em estrutura de alumínio no mundo, retrata uma realidade diferente em um país onde as estruturas em alumínio ocupam um lugar extremamente modesto.

Projetada por Cedric Marsh, a estrutura é uma cobertura do tipo “espacial”, na qual foram utilizados como nós, dispositivos de aço soldados e galvanizados a fogo. As barras são tubos de alumínio de diversos diâmetros com pontas amassadas e conectadas aos nós por meio de parafusos. Esta estrutura cobre uma área de 260m x 260m e é composta por 48.000 barras com diâmetro variando de 60 a 150mm, e uma relação altura da treliça pelo vão igual a 1/25.

Segundo MAGALHÃES (1996), para sua montagem foi utilizada a técnica de *lift-slab*, que consiste na montagem inicial da estrutura no piso da superfície que irá cobrir, sendo a estrutura içada e colocada posteriormente sobre os pilares. No caso desta estrutura, o içamento durou cerca de 27 horas (figura 1.18).

MAGALHÃES (1996) destaca ainda o esquema de apoios adotado nesta cobertura, para o qual foram utilizados 25 cavaletes com as extremidades articuladas de modo a restringir os deslocamentos em apenas uma das direções e dispostos de maneira a permitir os deslocamentos radiais, diminuindo assim, os esforços provocados por dilatação ou contração térmica (figura 1.19).

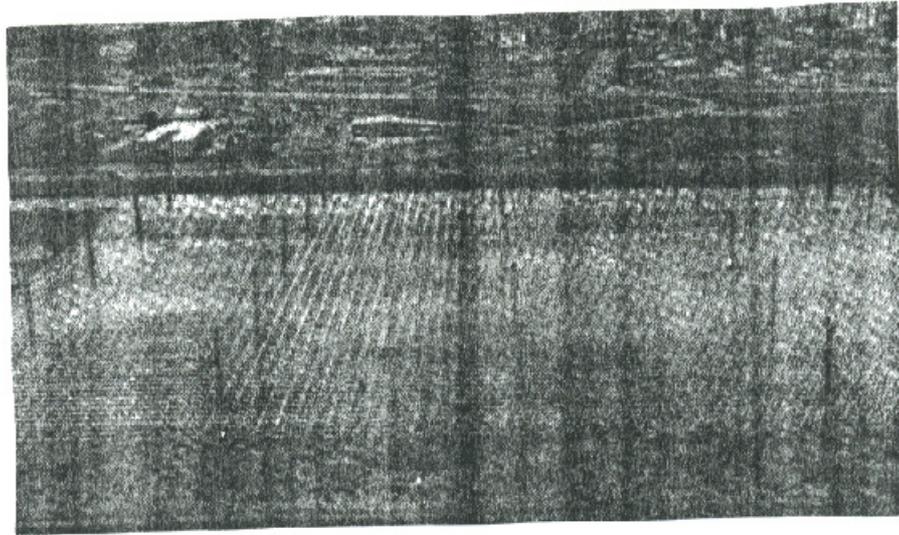


Figura 1.18: Içamento da estrutura.

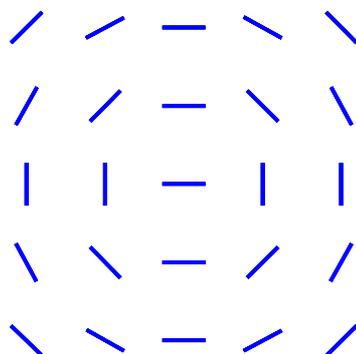


Figura 1.19: Disposição dos pilares.

Dentre os avanços na utilização do alumínio em estruturas no Brasil, destacam-se suas recentes aplicações no estado de Pernambuco com a conclusão em 1997 do Shopping Center Caruaru, que soma 63 toneladas de alumínio e 20.000 metros quadrados de área construída.

Em Garanhuns, o supermercado Dular, com área de 2.000 mil metros quadrados, apresenta uma estrutura espacial de alumínio. O mesmo ocorreu com o River Shopping Petrolina, com 18.000 metros quadrados de área de estruturas espaciais, marcando a paisagem da cidade (figura 1.20). As atenções se voltam agora para a ampliação de 8.000 metros quadrados do Centro de Convenção de Pernambuco que prevê uma estrutura espacial de alumínio.

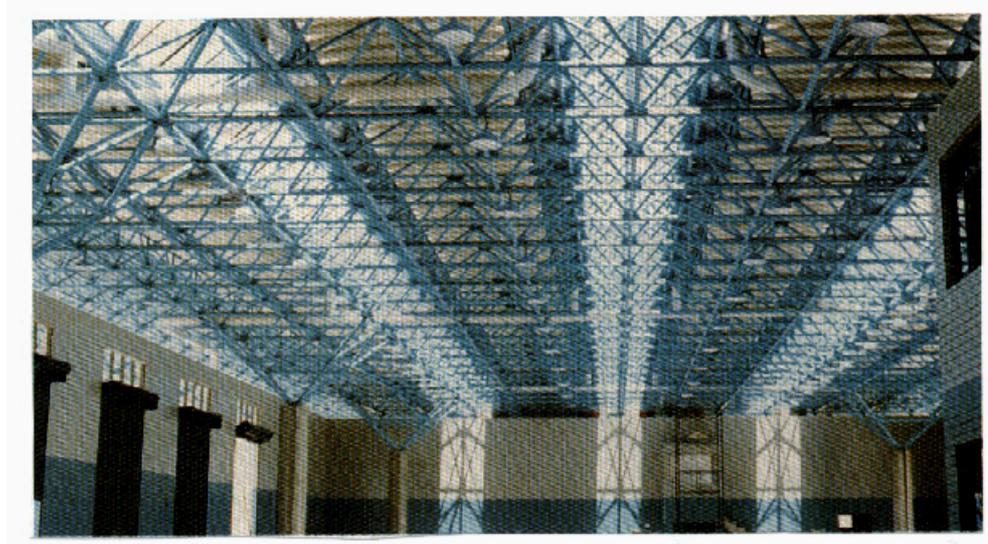


Figura 1.20: Estrutura Espacial do River Shopping Petrolina.

1.3. Histórico sobre as normas de dimensionamento de elementos estruturais em alumínio

O alumínio tem uma história comercial muito mais recente que a do aço, com a primeira produção de alumínio na data de 1888. A primeira norma para construções em aço foi publicada em 1923 (AISC) enquanto que a correspondente norma para alumínio data de 1967.

As primeiras recomendações para dimensionamento de estruturas de alumínio começaram a ser desenvolvidas pela ALCOA por volta de 1930 e foram utilizadas no projeto de recuperação da ponte *Smithfield Street Bridge* em Pittsburg , 1923, com tabuleiro apoiado em vigas de alumínio. Em maio de 1952, a ASCE publicou um artigo intitulado “*Specifications for Structures of Moderate Strength Aluminum Alloy of High Resistance to Corrosion*”. Estas especificações e as similares que seguiram em 1956 e 1962 resultaram dos trabalhos do “*Task Comitee on Ligthweight Alloys*” e “*Comitee on Metals*” da divisão de estruturas do ASCE. Ao mesmo tempo, os maiores produtores de alumínio, incluindo a ALCOA, seguida pela REYNOLDS e KAYSER, desenvolveram manuais para dimensionamento de seus produtos.

A primeira “*Specifications for Aluminum Structures*” foi publicada em 1967, pela ALUMINUM ASSOCIATION (AA), com base nos trabalhos da ASCE, e foi reconhecida pela indústria do alumínio. Posteriormente estas especificações substituíram as especificações da ASCE e de vários produtores e tornou-se parte de um manual constituído de cinco seções:

Seção 1: Especificações para estruturas em alumínio

Seção 1A: Comentários sobre as especificações

Seção 2: Exemplos de dimensionamento

Seção 3: Tabelas, ábacos, etc

Seção 5: Especificações para painéis de alumínio na construção de edifícios

A seção 3, contém tabelas com propriedades geométricas para chapas e perfis comumente utilizados, como perfil U, T, cantoneiras e vigas I, além de outras informações usuais para o projeto.

A norma da AA⁽¹⁾ apresentava dois fatores de segurança, um para edificações e outro para pontes. O fator de segurança para edificações foi aproximadamente compatível com o utilizado nas edificações de aço, enquanto que o fator de segurança para pontes é maior do que o empregado em edificações.

A norma da AA foi revisada em 1971, 1976, 1982 e 1986, mas muitas das prescrições permaneceram sem modificações. Na sua quinta edição em 1986, as prescrições sobre fadiga foram significativamente expandidas para definir categorias de tensão similares às usadas para aço.

Em 1994, na sexta edição, a norma do AA introduziu várias alterações. A novidade mais relevante foi a inserção do método dos estados limites (LRFD) para alumínio nos Estados Unidos. Anteriormente já havia sido publicado no Canadá o *Strength Design in Aluminum* (1983) que foi o primeiro trabalho com estes conceitos para o alumínio.

As especificações em estados limites da AA aplicam-se apenas a determinados tipos de edificações. No caso de elementos estruturais de pontes, este conceito é apresentado no *Bridge Design Specification* (1994) da AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO) desenvolvido em cooperação com a AA.

Em 1999, destaca-se a publicação do *Eurocode 9: Design of Aluminum Structures* com prescrições gerais e prescrições para edificações.

(1) O termo “norma da AA” constantemente empregado neste trabalho refere-se a norma da ALUMINUM ASSOCIATION. A norma atual da AA encontra-se listada na bibliografia com o título de: “*Specifications for Aluminum Structures*”, 5ª edição de 1986.

2. Ligas Estruturais de Alumínio

2.1. Tipos e Classificação

O alumínio puro é um material com propriedades mecânicas inadequadas para uso estrutural. Para melhorar estas propriedades adicionam-se ao alumínio outros materiais, constituindo as ligas estruturais de alumínio.

As ligas estruturais de alumínio dividem-se em dois grandes grupos:

- ligas tratáveis termicamente
- ligas não tratáveis termicamente

As ligas não tratáveis termicamente têm suas propriedades melhoradas pelo tratamento mecânico a frio, enquanto que as ligas tratáveis termicamente têm suas propriedades melhoradas após tratamento térmico.

Dentre as ligas tratáveis termicamente existem aquelas que possuem elementos com solubilidade baixa ou elevada em função de alta ou baixa temperatura. Nas ligas não tratáveis termicamente os elementos permanecem em solução sólida ou forma constituintes insolúveis, sem que o tratamento térmico influencie suas propriedades mecânicas.

O tratamento térmico ou mecânico produz no material uma condição denominada têmpera, conferindo-lhe estrutura e propriedades mecânicas características.

A simbologia empregada no Brasil para designar as têmperas de ligas de alumínio segue a empregada em outros países como o Canadá, onde as têmperas de ligas tratáveis termicamente são indicadas pela letra T seguida de um número que representa a ordem de operações a que a liga foi submetida, e as ligas não tratáveis termicamente são indicadas pela letra H seguida de dois algarismos, sendo o primeiro referente à prática de produção seguida, e o segundo refere-se ao grau de endurecimento atingido.

Desse modo, têm-se para as ligas tratáveis termicamente:

T3- Liga solubilizada e encruada,
T4- Liga solubilizada (esfriamento com água),
T4A- Liga solubilizada (esfriamento com ar),
T5- Liga envelhecida artificialmente,
T6- Liga solubilizada e envelhecida artificialmente,
T9- Liga solubilizada, envelhecida artificialmente e encruada,
T10- Liga envelhecida artificialmente e encruada,

ou ainda:

O - Liga recozida,
F- Liga como fabricada e
W- Liga com têmpera instável.

Para as ligas não tratáveis termicamente têm-se a seguinte correspondência para o primeiro algarismo:

H 1- Material encruado,
H 2- Material encruado e parcialmente recozido e
H 3- Material encruado e estabilizado.

Com relação ao segundo algarismo têm-se:

1- 1/8 de dureza,
2- 1/4 de dureza,
4- 1/2 duro,
6- 3/4 duro,
8- duro e
9- extra duro.

As ligas não tratáveis termicamente podem apresentar-se na têmpera recozida (O) ou na têmpera como fabricada (F), entretanto não apresentam garantia das propriedades mecânicas.

As diversas ligas de alumínio são designadas por quatro dígitos seguidos pela letra que indica sua têmpera. A AA tem na ANSI H35.1(1993), os registros das diversas designações das ligas de alumínio e suas têmperas para os Estados Unidos. Esta

associação listou recentemente 82 ligas com diferentes composições químicas em sua publicação *Aluminium Standard and Data* (1993), para várias têmperas.

Em função das características dos elementos da liga podem ser listadas as seguintes séries de ligas:

- *Série 1000* : Esta série apresenta 99% ou mais de alumínio em sua composição química. Desta forma, apresenta excelente resistência à corrosão e a trabalhabilidade e condutividade elétrica são melhoradas. As ligas desta série têm limitada utilização estrutural em função da baixa resistência mecânica do alumínio puro.
- *Série 2000* : O cobre é o elemento de liga nesta série. As ligas desta série têm um ganho de resistência mecânica com o tratamento térmico, mas perde resistência à corrosão se comparadas com as anteriores, sendo que algumas destas não são soldáveis. Estas limitações tornam-as não aplicáveis em certas estruturas, como por exemplo aeronaves. Algumas destas ligas apresentam maior resistência à corrosão que as ligas da série 6000.
- *Série 3000* : Este grupo utiliza o manganês para obter moderada resistência e boa trabalhabilidade. As ligas desta série não são tratáveis termicamente. As ligas 3003, 3004 e 3015 são comumente empregadas como chapas na construção.
- *Série 4000* : O silício diminui o ponto de fusão das ligas desta série, tornando-as utilizáveis em soldas a quente, como a 4043.
- *Série 5000* : O magnésio conduz à boa resistência em aplicações soldadas ou não soldadas das ligas de alumínio desta série. Entretanto concentrações de magnésio superiores a 3% podem causar problemas de corrosão em temperaturas superiores a 65 °C. As ligas desta série são não tratáveis termicamente, podendo ser usadas em painéis ou perfis de alumínio na construção de estruturas soldadas.
- *Série 6000* : Esta série usa magnésio e silício combinados para se obter maior resistência mecânica aliada à resistência a corrosão. Estas ligas são tratáveis termicamente, sendo as ligas 6061, 6063 e 6351 de grande aplicação estrutural.
- *Série 7000* : O zinco é o elemento de liga com maior concentração nesta série, produzindo aumento de resistência mecânica na liga quando tratada termicamente.

Estas ligas são geralmente mais resistentes que as da série 6000, porém com menor resistência a corrosão. As ligas da série 7000 são geralmente especificadas para aeronaves, sendo a 7075 comumente utilizada em construções industriais.

Com relação ao tratamento das ligas destas séries pode-se agrupar as séries 1000, 3000, 4000 e 5000 como ligas não tratáveis termicamente e as séries 2000, 6000 e 7000 como ligas tratáveis termicamente.

2.2. Especificações

Para as ligas estruturais, os fabricantes no Brasil especificam em catálogos técnicos os seguintes dados:

- nomenclatura brasileira da liga e nomenclatura equivalente de diversas normas,
- formas e acabamentos disponíveis,
- composição química,
- propriedades mecânicas,
- aplicações características
- curvas de flambagem para as diversas ligas e têmperas.

A curva de flambagem, definida para cada liga e têmpera, é fornecida pelo fabricante do material e obtida de acordo com o seguinte procedimento (figura 2.1):

1. Traça-se a curva de Euler, dada pela seguinte expressão clássica:

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (2.1)$$

2. Marca-se o valor da resistência ao escoamento na compressão (ponto A).
3. Traça-se a reta horizontal que contém o ponto A e define-se o ponto B, pela intersecção da reta com a curva de alongamento.
4. A medida AB é transferida para o eixo das ordenadas e define-se o ponto B'.

5. Traça-se a reta que contém B' e é tangente à curva de Euler, definindo-se os pontos M e N.
6. Finalmente, a curva de flambagem é definida pelos três trechos: reta AM, reta MN e hipérbole de Euler.

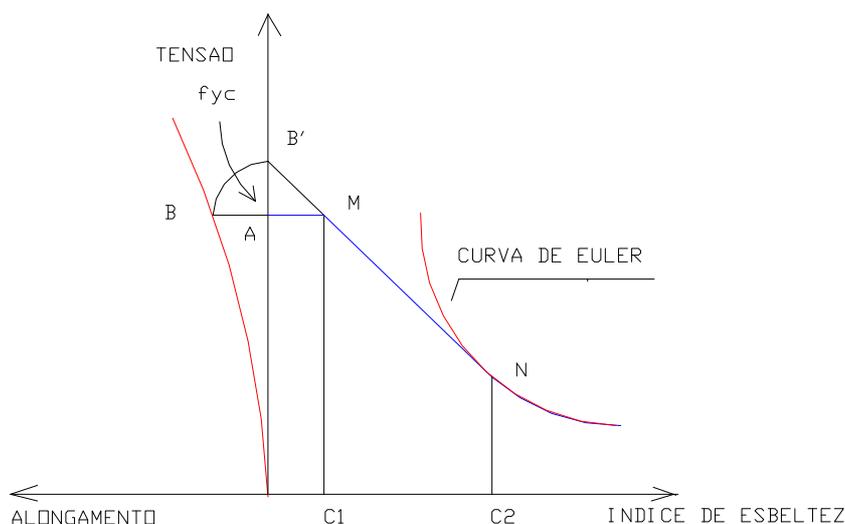


Figura 2.1: Curva de Flambagem (método de traçagem).

O procedimento anterior é o utilizado pelos fabricantes para a construção da curva de flambagem das diferentes ligas. Não foi encontrada na literatura uma explicação mais detalhada sobre a construção das curvas de flambagem, de maneira a esclarecer, por exemplo, como compatibilizar as grandezas alongamento e tensão (passagem do ponto B para o ponto B').

Pode-se observar na curva de flambagem três trechos distintos, duas retas e a hipérbole de Euler.

A seguir são apresentadas as curvas de flambagem para as ligas 6351 e 6063, de grande utilização estrutural.

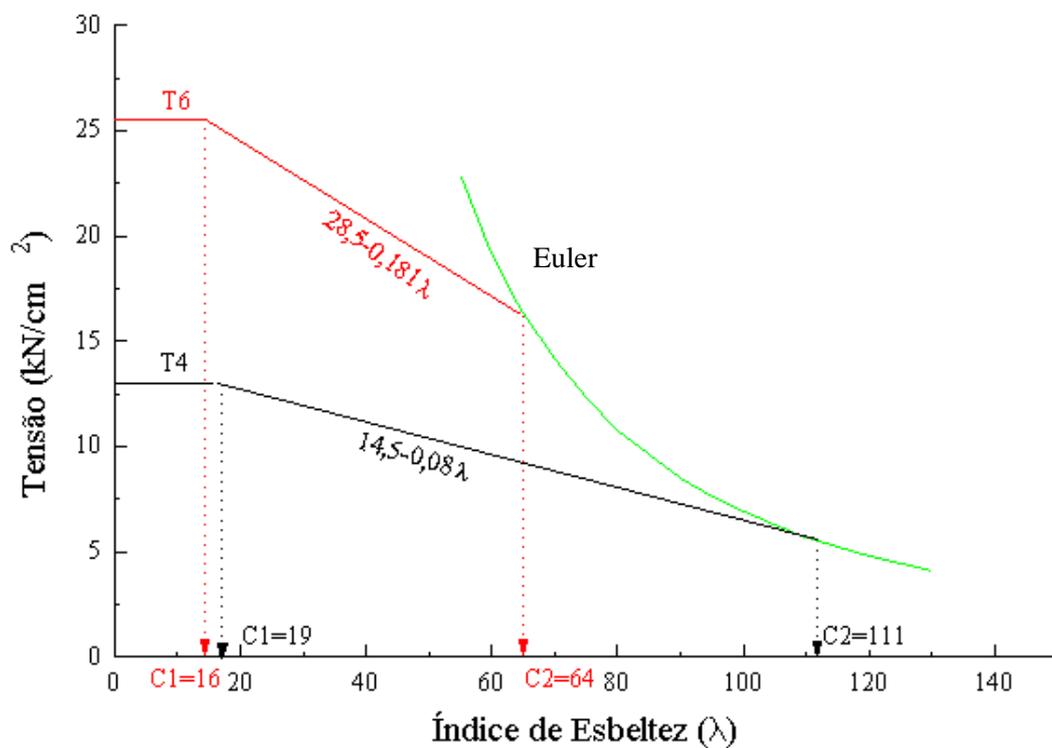


Figura 2.2: Curva de flambagem para liga 6351 (têmperas T4 e T6).

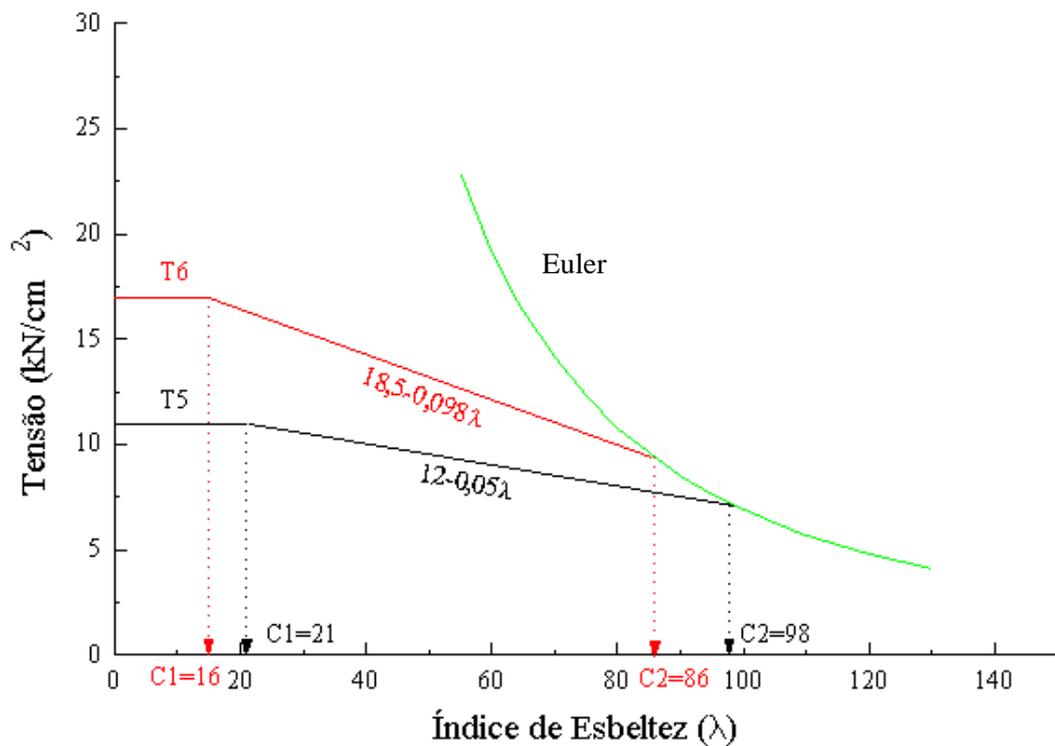


Figura 2.3: Curva de flambagem para a liga 6063 (têmperas T5 e T6).

Atenta-se para o fato das curvas apresentadas pelos fabricantes não considerarem os fatores de segurança empregados no dimensionamento, ou seja, não são as tensões admissíveis. As curvas apresentadas pela AA são determinadas em função das tensões admissíveis, portanto apresentam algumas diferenças em relação as curvas fornecidas pelos fabricantes.

2.3. Propriedades do material

2.3.1. Propriedades mecânicas

A ausência de normalização nacional sobre o assunto implica na consulta a normas estrangeiras, as quais especificam o alumínio, enquanto material estrutural, estabelecendo valores mínimos das propriedades mecânicas:

- resistência ao escoamento na tração (f_{ty}) e resistência à ruptura na tração (f_{tu})
- resistência ao escoamento na compressão (f_{cy})
- resistência ao escoamento por cisalhamento (f_{sy}) e resistência à ruptura por cisalhamento (f_{su})
- resistência ao escoamento por esmagamento (f_{by}) e resistência à ruptura por esmagamento (f_{bu})
- Módulo de elasticidade na compressão (E_c)
- Módulo de elasticidade na tração (E_t)
- Módulo de deformação transversal (G), dado pela expressão:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.2)$$

Como ocorre com o aço, no projeto de estruturas em alumínio empregam-se valores mínimos para as propriedades mecânicas, embora os valores apresentados em texto como o *Aluminum Design Manual*, parte V, e tidos como usuais, sejam mais frequentes.

Os valores usuais são da ordem de 15% maiores que os valores mínimos.

As tensões limites obtidas nos ensaios de tração são apresentadas na ASTM B557, *Tension Testing Wrought and Casting Aluminum and Aluminum-Alloy Rivets and Cold-Heading Wire and Rods* (1993), e os ensaios de cisalhamento são descritos pela

ASTM B565, *Shear Testing of Aluminum and Aluminum-Alloy, Rivets and Cold-Heading Wire and Rods* (1994).

Para a obtenção das resistências ao escoamento e à ruptura por tração, são ensaiados vários tipos de produtos como chapas, extrudados, laminados etc.

Diferentemente dos aços normalmente utilizados em estruturas, o alumínio não apresenta patamar de escoamento no gráfico tensão x deformação, sendo a tensão de escoamento do material determinada de maneira convencional, tomando por exemplo o valor correspondente ao ponto de intersecção de uma reta paralela ao trecho linear da curva, traçada a partir de uma origem deslocada de 0,2% na abcissa, com a curva do material (mét 410 MPa et 0,2 %).

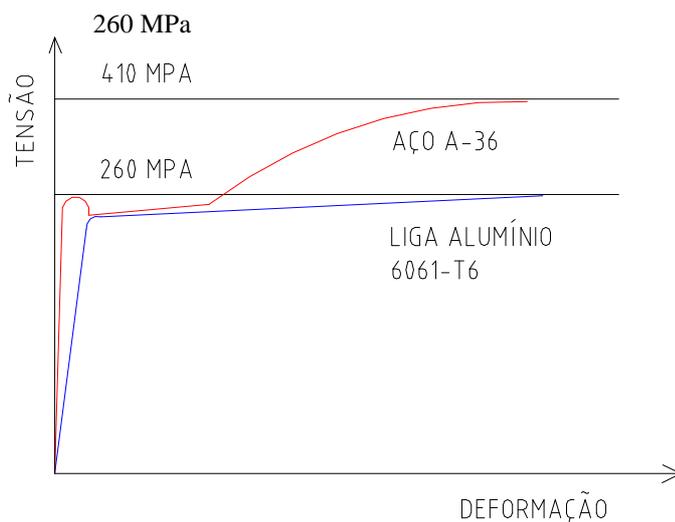


Figura 2.4: Comparação entre as curvas tensão x deformação para o aço ASTM A36 e a liga de alumínio 6061-T6.

A resistência à ruptura por compressão não é incluída como uma propriedade significativa para o alumínio.

Para um material dúctil, como o alumínio, a resistência à ruptura por compressão não tem nenhum significado. Nos ensaios de compressão o metal apresenta falhas localizadas como esmagamento ou flambagem, mas não ocorre ruptura propriamente dita.

A única propriedade mecânica mínima que é publicada pela AA em *Aluminum Standards and Data* (1993), para todas as ligas, é a resistência à ruptura por tração. A resistência ao escoamento por tração é publicada para a maioria das ligas, mas não para todas.

Nas publicações sobre alumínio estas propriedades podem ser encontradas em especificações, sendo utilizadas relações entre elas que facilitam a avaliação de uma determinada propriedade a partir de outra já conhecida.

Relações aproximadas entre as resistências ao escoamento e resistência à ruptura por tração e outras resistências foram publicados no Canadá, no *Strength Design in Aluminum* (1993), e são:

$$\left. \begin{aligned} f_{cy} &= 0,9 f_{ty} && \text{(para ligas não tratáveis termicamente)} \\ f_{cy} &= f_{ty} && \text{(para ligas tratáveis termicamente)} \\ f_{su} &= 0,6 f_{tu} \\ f_{sy} &= 0,6 f_{ty} \end{aligned} \right| \quad (2.3)$$

O módulo de elasticidade à compressão varia de 7.000 kN/cm² a 7.600 kN/cm², (variação em torno de 10% para as ligas comumente utilizadas).

Pode-se falar ainda em módulo de elasticidade à tração, cujo valor é cerca de 2% menor que o valor na compressão. Na flexão ocorre uma combinação de compressão e tração. Para o cálculo de flecha, KISSEL & FERRY (1995) descreve que é usual empregar um “valor médio”, igual ao módulo de elasticidade na compressão menos 70 kN/cm².

A favor da segurança e para simplificar os cálculos é razoável adotar um valor convencional de 7.000 kN/cm² para todos os casos.

O coeficiente de Poisson é assumido como 0,33, conduzindo ao seguinte valor para o módulo de elasticidade transversal:

$$G = 0,375E \quad (2.4)$$

Outra propriedade mecânica do material é o alongamento após a ruptura, definido como sendo a porcentagem de alongamento referente a uma base de medida marcada no corpo-de-prova nos ensaios de tração. Valores característicos de alongamento são apresentados para algumas ligas de alumínio no *Aluminum Design Manual* (1994) parte V, tabela 5. Valores mínimos de alongamento para a maioria das ligas e têmperas são dados no *Aluminum Standards and Data* (1993).

O alongamento na ruptura fornece uma indicação geral da ductilidade do material, permitindo uma análise do material com deformações plásticas antes da ruptura.

2.3.2. O efeito da soldagem nas propriedades mecânicas

Assim como ocorre com o aço, a solda afeta as propriedades mecânicas das ligas de alumínio. Segundo KISSEL & FERRY (1995), na região da solda, tida como a parte do material distante até 1" (25,4 mm) do centro da solda, as resistências são reduzidas tanto para as ligas tratáveis termicamente como para as não tratáveis termicamente. Entretanto esta redução é pequena para algumas ligas da série 5000, neste caso especialmente recomendadas para elementos soldados.

As propriedades mecânicas mínimas, nesta situação, são apresentadas na norma da AA, e distinguidas pelo índice subscrito w . Desse modo, a resistência ao escoamento por tração, por exemplo, passa a ser designada por f_{tyw} .

2.3.3. O efeito da temperatura nas propriedades mecânicas

Para as ligas mais utilizadas, quando a temperatura diminui, os valores de resistência a sollicitações normais aumentam. Isto faz do alumínio um excelente material para aplicações estruturais em baixas temperaturas. Por outro lado, o alumínio tem o ponto de fusão igual a 660 °C, valor menor que o do aço.

2.3.4. Demais propriedades físicas

Além das já citadas propriedades físicas das ligas de alumínio, é de interesse em projeto o uso de propriedades como a densidade e o coeficiente de dilatação térmica. Embora estes valores sejam especificados para várias ligas no *Aluminum Design Manual* (1994), a variação é relativamente pequena de liga para liga, portanto adotam-se valores convencionais que são aplicáveis a qualquer liga.

Deste modo, adota-se a densidade igual a 2.700kg/m^3 e o coeficiente de dilatação térmica igual a $23,9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

A tabela 2.1 resume as principais propriedades físicas das ligas de alumínio.

Tabela 2.1: Propriedades físicas das ligas de alumínio empregadas em projeto.

PROPRIEDADES FÍSICAS	VALOR
módulo de elasticidade	70.000 MPa
módulo de deformação transversal	26.300 MPa
coeficiente de Poisson	0,33
densidade	2700 kg/m^3
coeficiente de dilatação térmica	$23,9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Tabela 2.2: Constantes físicas do alumínio puro (99,95%).

CONSTANTES FÍSICAS	VALOR
ponto de fusão	$660 ^\circ\text{C}$
ponto de ebulição a 760mm Hg	$2327 ^\circ\text{C}$
condutividade térmica a $25 ^\circ\text{C}$	$220 \text{ W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$
calor específico médio (0 - $100 ^\circ\text{C}$)	$940 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$
calor latente de fusão	$390 \text{ kJ} / \text{kg}$
resistividade elétrica a $20 ^\circ\text{C}$	$0,0028 \mu \Omega \text{ m}$
coeficiente de temperatura de resistividade	$0,00429 \Omega / ^\circ\text{C}$

2.3.5. Especificações do alumínio

Existem várias especificações para as ligas de alumínio, incluindo no âmbito internacional a do *American Society for Testing and Materials* (ASTM), *Aerospace Materials Specifications* (AMS), *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) e *American Welding Society* (AWS).

Os vários fabricantes também apresentam nomenclatura própria para os seus produtos, entretanto esta deve ter a respectiva correspondência com as diversas normas.

A seguir é apresentada a tabela 2.3 com as especificações entre algumas ligas mais usualmente empregadas.

Tabela 2.3: Equivalência entre normas para especificação de ligas de alumínio.

LIGAS DE ALUMÍNIO EQUIVALÊNCIA ENTRE NORMAS:						
Canadá	Brasil	USA	Alemanha	Itália	França	Inglaterra
ALCAN	ABNT	AA / ASTM / ALCOA	DIN	UNI	NF ou AIR	BS
1S	1050	1050	Al 99,5	P-ALP 99,5	A5	1B
D1S	1350	1350	E-Al 99,5		A5 / L	1E
2S	1200	1200	Al 99	P-ALP 99,0	A4	1C
16S	2117	2117	Al Cu Mg 1	P-Al Cu 4 Mg Mn	A-U2G	2L.86
17S	2017	2017	Al Cu Mg 2	P-Al Cu 4,4 Si Mn Mg	A-U4G	5L.37
24S	2024	2024	Al Cu Si Mn	P-Al Cu 5,5 Pb Bi	A-U4G1	L.97
26S	2014	2014	Al Cu Bi Pb		A-U4SG	L.94
28S	2011	2011	Al Si 5		A-U4Pb	FC1
33S	4043	4043		P-Al Mg Si		N21
35S	4047	4047	E-Al Mg Si 0,5	P-Al Mg Si Cu		N2
50S	6063	6063	Al Mg Si 1	P-Al Si 0,5 Mg	A-GS	H9
C50S	6463	6463		P-Al Si 1 Mg Mn	A-GS / L	BTR6
D50S	6101	6101	Al Mg 5		A-SGM	91E
B51S	6351	6351		P-Al Mg 5		H30
55S	6053	6053		P-Al Mg 2,5	A-G5 MC	
56S	5056	5056				N6
57S	5052	5052		P-Al Mg 1 Si Cu		
R57S						
65S	6061	6061				H20
D65S	6261	6261				
66S						
C74S	7104	7104				

A composição química das ligas de alumínio é bastante variável como ilustra a tabela 2.4 com a composição química de algumas ligas.

Tabela 2.4: Composição química de algumas ligas (%).

LIGA	3003	3004	5052	5083	5454	6061	6063	6351	7004
Silício	0,6	0,3	0,25	0,4	0,25	0,4 a 0,8	0,2 a 0,6	0,7 a 1,3	0,25
Ferro	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4	0,7	0,355	0,5	0,35
Cobre	0,05 a 0,2	0,25	0,1	0,1	0,1	0,15 a 0,4	0,1	0,1	0,05
Manganês	1,0 a 1,5	1,0 a 1,5	0,1	0,4 a 1,0	0,5 a 1,0	0,15	0,1	0,4 a 0,8	0,2 a 0,7
Magnésio	-	0,8 a 1,3	2,2 a 2,8	4,0 a 4,9	2,4 a 3,0	0,8 a 1,2	0,45 a 0,9	0,4 a 0,8	1,0 a 2,0
Zinco	0,1	0,25	0,1	0,25	0,25	0,25	0,1	0,2	3,8 a 4,6
Cromo	-	-	0,15 a 0,35	0,05 a 0,25	0,05 a 0,2	0,04 a 0,35	0,1	-	0,05
Titânio	-	-	-	0,15	0,2	0,15	0,1	0,2	0,05
Zircônio	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1 a 0,2
Outros	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Alumínio	% restante								

Nos Estados Unidos é usual o procedimento de pintura na peça designando a cada cor uma liga estrutural. A tabela 2.5 apresenta as cores e suas ligas correspondentes.

Tabela 2.5: Identificação das ligas através de cores.

LIGA	COR
2014	cinza
3003	verde
5005	amarelo e vermelho
5050	azul e preto
5052	púrpura
5083	vermelho e cinza
5086	vermelho e laranja
5456	cinza e púrpura
6061	azul e preto
6063	amarelo e verde
6351	púrpura e laranja
7075	preto

A tabela 2.6 apresenta características das ligas fabricadas no Brasil pela ALCOA com seus produtos típicos e aplicações, e a tabela 2.7 contém um resumo das propriedades mecânicas das ligas mais empregadas.

Tabela 2.6: Características e produtos típicos de algumas ligas [extraída do manual da ALCOA (1997)].

Ligas e têmperas - características					
Liga	Têmpera		Produtos Típicos	Características	Aplicação
	Extrudado	Trefilado			
1050	F O	U	Tubo	Baixa resistência mecânica. Alta resistência à corrosão. Boa conformabilidade, soldabilidade e anodização. Não recomendada para usinagem. Não tratável termicamente.	Indústria química e alimentícia. Trocadores de calor.
		H14 H18	Barra redonda		
1100	F O	O H14 H18	Tubo Barra redonda		
1200	F O	O H14	Tubo Barra redonda		
1350	F O		Tubo	Alta condutividade elétrica. Outras, conforme quadro acima.	Própria para condução elétrica.
			Barra redonda Barra Chata		
2011	T4 T6	T3 T8	Barra redonda	Alta resistência mecânica. Boa usinabilidade. Média resistência a corrosão. Não recomendável para solda.	Peças usinadas em torno automático.
2014	F O T4 T6		Barra redonda	Alta resistência mecânica. Média usinagem e resistência à corrosão. Não recomendável para solda.	Forjamento de alta resistência. Indústria aeronáutica, transporte e equipamentos.
		T4 T6			
2024	O T4		Barra redonda	Semelhante à 2014. Resistência ao escoamento mais elevada.	Forjamento de alta resistência Indústria aeronáutica, transporte e equipamentos.
3003	F O	O H14 H18	Tubo	Média resistência mecânica. Alta resistência à corrosão. Boa para conformação a frio e soldagem.	Trocadores de calor. Indústria química.

continua ...

... continuação Tabela 2.6 ...

Ligas e têmperas - características					
Liga	Têmpera		Produtos Típicos	Características	Aplicação
	Extrudado	Trefilado			
6061	F O T4 T6	T9 T8	Tubo	Alta resistência mecânica Alta resistência à corrosão. Boa conformabilidade e soldabilidade.	Estruturas civis de meios de transportes, mecânicas e navais.
6063	F O T4 T4A T5 T6 T6C	T8	Barra redonda Tubo Perfis em geral	Média resistência mecânica. Alta resistência à corrosão. Boa para formação a frio e soldagem. Própria para anodização decorativa fosca.	Construção civil. Caixilharia em geral. Ornamentos. Tubos para irrigação.
6101	F O T6		Barra redonda Tubo Perfis	Alta condutividade elétrica e resistência a corrosão. Média resistência mecânica.	Fios elétricos. Barramentos.
6261	T4 T6 T6C		Barra redonda Tubo Perfis estruturais	Boa resistência mecânica. Boa resistência à corrosão. Boa conformabilidade.	Carrocerias de veículos. Estruturas e equipamentos.
6262	T6	T9	Barra redonda	Boa usinabilidade. Alta resistência mecânica. Alta resistência à corrosão. Apropriada para anodização decorativa.	Peças usinadas em torno automático.
6351	T4 T6		Barra redonda Tubo Perfis estruturais	Alta resistência mecânica. Alta resistência à corrosão. Boa conformabilidade. Anodização só como proteção.	Engenharia estrutural Construção de navios veículos e equipamentos. Acessórios para cabos.

... continuação Tabela 2.6 ...

Ligas e têmperas - características					
Liga	Têmpera		Produtos Típicos	Características	Aplicação
	Extrudado	Trefilado			
7075	O T6		Barra redonda	Os mais altos valores de resistência mecânica. Média resistência à corrosão. Boa forjabilidade.	Peças sujeitas aos mais altos esforços mecânicos em indústria aeronáutica, máquinas e equipamentos.

continua ...

Tabela 2.7 Propriedades mecânicas de algumas ligas [extraída do manual da ALCOA (1997)].

Propriedades Mecânicas	Resistência à ruptura por tração - f_{tu} (MPa)		Resistência ao escoamento por tração - f_{ly} (MPa)		alongamento (%) 50 mm	dureza Brinell
	mín.	máx.	mín.	máx.		
1050-O	66,0	91,4	20,3	-	27	20
1050-H14	101,5	-	71,1	-	8	30
1050-H18	132,0	-	-	-	-	-
1100-O	76,2	106,6	20,3	-	25	23
1100-H12	96,5	-	-	-	-	28
1100-H14	111,7	-	-	-	-	32
1100-H16	132,0	-	-	-	-	38
1100-H18	152,3	-	-	-	-	44
1200-O	76,2	101,5	30,5	-	25	22
1200-H14	101,5	152,3	81,2	-	5	35
2011-T3	294,5	-	208,2	-	12	95
2011-T4	279,2	-	126,9	-	16	-
2011-T8	375,7	-	279,2	-	10	100
2014-O	-	208,1	-	126,9	12	45
2014-T4	350,3	-	243,7	-	12	105
2014-T6	421,4	-	370,6	-	7	135
2024-O	-	243,7	-	-	12	47
2024-T3	401,1	-	294,5	-	12	120
2024-T4	401,1	-	264,0	-	12	120
2024-T8	446,8	-	390,9	-	4	-
3003-O	5,1	132,0	35,5	-	25	28
3003-H12	116,8	-	86,3	-	-	35
3003-H14	142,2	-	116,8	-	3	40
3003-H16	167,5	-	147,2	-	2	47
3003-H18	187,8	-	267,5	-	-	55
6061-O	-	152,3	-	111,7	16	30
6061-T4	182,8	-	111,7	-	16	65
6061-T6	264,0	-	243,7	-	8	95
6061-T8	345,2	-	264,0	-	-	-
6061-T9	355,4	-	289,4	-	-	-
6063-O	-	132,0	-	-	18	25
6063-T4	126,9	-	60,9	-	14	50
6063-T4A	111,7	-	55,8	-	15	48
6063-T5	147,2	-	106,6	-	8	60
6063-T6	208,2	-	172,6	-	8	73
6063-T6C	188,2	-	147,2	-	8	65
6061-T4	187,8	-	111,7	-	20	60
6061-T4A	177,7	-	101,5	-	21	55
6061-T6	269,1	-	228,5	-	10	90
6061-T6C	258,9	-	218,3	-	11	85
6262-T6	264,0	-	243,7	-	10	90
6262-T9	350,3	-	319,8	-	5	120
6351-O	101,5	152,3	50,8	101,5	16	35
6351-T4	223,4	-	132,0	-	16	60
6351-T6	294,5	-	258,9	-	8	95
7075-O	-	279,2	-	167,5	10	60
7075-T6	548,3	-	492,5	-	7	150

3. Barras Submetidas à Tração

A especificação da AA estabelece que a tensão calculada com base na área líquida não deve ultrapassar os seguintes valores admissíveis:

$$\frac{f_{ty}}{(FS)_y} \quad e \quad \frac{f_{tu}}{(k_t)(FS)_u} \quad (3.1)$$

Onde:

f_{ty} - resistência ao escoamento por tração,

f_{tu} - resistência à ruptura por tração,

$(FS)_y$ - fator de segurança no escoamento, igual a 1,65,

$(FS)_u$ - fator de segurança na ruptura, igual a 1,95 e

k_t - coeficiente de modificação do fator de segurança empregado em algumas ligas.

Substituindo os valores dos fatores de segurança $(FS)_y$ e $(FS)_u$ as expressões para cálculo das tensões admissíveis resultam em:

$$\frac{f_{ty}}{1,65} \quad e \quad \frac{f_{tu}}{(k_t)1,95} \quad (3.2)$$

O coeficiente de tração k_t é igual a 1,0 para a maioria das ligas listadas na norma da AA, exceto para a liga 2014-T6, cujo valor de k_t é igual a 1,25.

Admitindo o valor do coeficiente k_t igual a 1,0, a razão entre os fatores de segurança no escoamento e na ruptura é igual a $1,65/1,95 = 0,85$, o que permite afirmar que a capacidade admissível de uma liga à tração com resistência ao escoamento maior que 85% da resistência à ruptura, será determinada pela resistência à ruptura. A tabela 3.1 ilustra este fato.

Tabela 3.1: Resistência admissível à tração de algumas ligas.

VALORES DE RESISTÊNCIAS (MPa)						
LIGA	f_{ty}	f_{tu}	f_{ty}/f_{tu}	$f_{ty}/(FS)_y$	$f_{tu}/(FS)_u$	determinada por:
6063-T6	180	216	0,83	109	111	ESCOAMENTO
6061-T6	252	274	0,92	153	141	RUPTURA
1100-H4	100	115	0,87	61	59	RUPTURA

Atingir a resistência à ruptura por tração significa que a barra está na iminência da ruptura, o que basta ocorrer em apenas uma única seção para caracterizar a falha.

Por outro lado, o escoamento de uma seção transversal ou de uma pequena região da barra em geral não caracteriza a falha, tendo em vista que o alongamento total de uma barra depende principalmente da parcela de seu comprimento em escoamento.

Tendo em vista este fato, autores como KISSEL & FERRY (1995) analisam o escoamento admitindo a seção bruta da barra.

Entretanto a norma da AA não reconhece este fenômeno, recomendando, como já descrito, as verificações da ruptura e do escoamento tomando-se a seção transversal líquida efetiva em ambos os casos.

A determinação da resistência de barras tracionadas em alumínio, descrita na norma da AA, é similar à determinação da resistência de barras tracionadas em aço estabelecida no AISC-ASD (1989), cujos valores das tensões admissíveis para barras tracionadas são:

$$0,6f_{ty} \text{ (ou } f_{ty}/1,67) \text{ na seção transversal bruta}$$

$$0,5f_{tu} \text{ (ou } f_{tu}/2,00) \text{ na seção transversal líquida efetiva.}$$

Segundo MARSH (1983), para a determinação da área efetiva de uma seção transversal é possível distinguir três tipos básicos de seção, considerando as seguintes variáveis:

A_e - área líquida efetiva da seção transversal,

b - largura da chapa ou soma das larguras das mesas e almas,

e - excentricidade da força em relação ao centróide da seção,

g, s - distâncias entre os centros dos furos, sendo perpendicular e paralela à direção da sollicitação respectivamente,

t - espessura da chapa,

A_f - área líquida do elemento conectado,

A_ℓ - área líquida do elemento não conectado,

d_h - diâmetro do furo, e

n - número de furos na seção analisada (seção normal ao eixo da barra ou em zig-zag).

1- Para chapas com ligação centrada em uma única linha de parafusos, a área efetiva é igual a própria área líquida:

$$A_e = (b - d_h)t \quad (3.3)$$

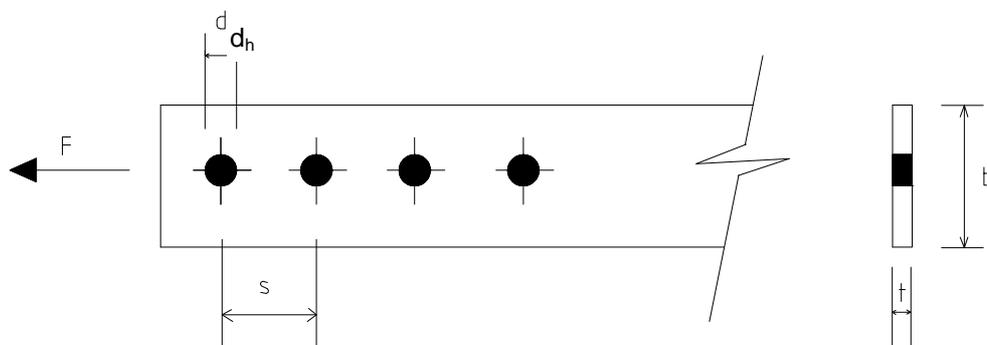


Figura 3.1: Chapa com ligação centrada e uma linha de parafusos.

No caso de furos em zig-zag, a expressão é:

$$A_e = \left[b - nd_h + \frac{(n-1)s^2}{4g} \right] t \quad (3.4)$$

Nota-se que a expressão 3.4 é a mesma tradicionalmente proposta pelo AISC.

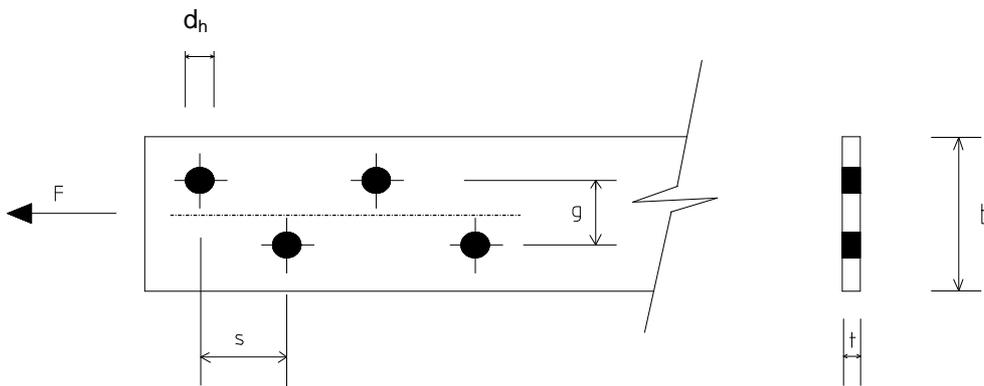


Figura 3.2: Chapa com furos em zig-zag.

2- Para chapas com ligações excêntricas, têm-se:

$$A_e = \left[\sqrt{(4e^2 + b^2)} - 2e - d_h \right] t \quad (3.5)$$

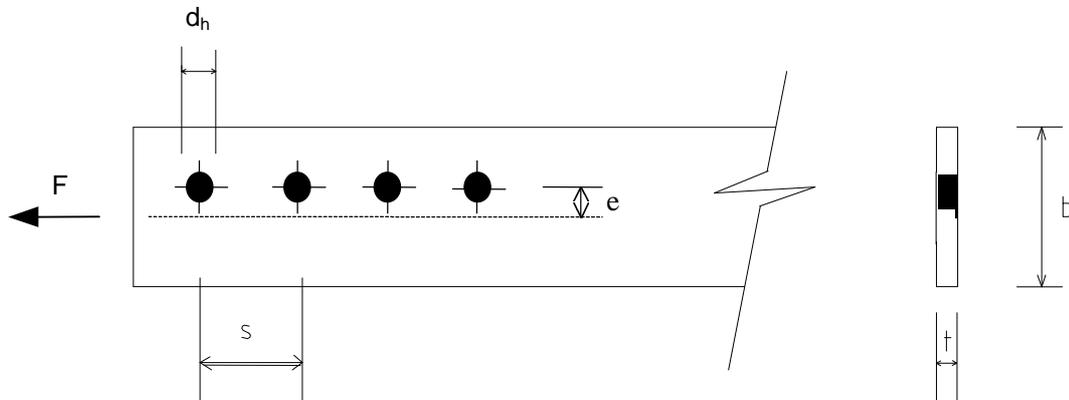


Figura 3.3: Chapa com ligação excêntrica.

No caso de ocorrer dois ou mais furos alinhados transversalmente na chapa, simetricamente dispostos segundo a linha de ação da força, a variável d_h poderá ser tomada como a soma dos diâmetros dos furos, na expressão (3.5).

Para o cálculo das áreas efetivas de perfis “parcialmente conectados”, ou seja, com uma ou mais partes não conectadas, MARSH (1983) propõe as seguintes expressões:

1- Para cantoneira simples:

$$A_e = A_f + \frac{A_\ell}{3} \quad (3.6)$$

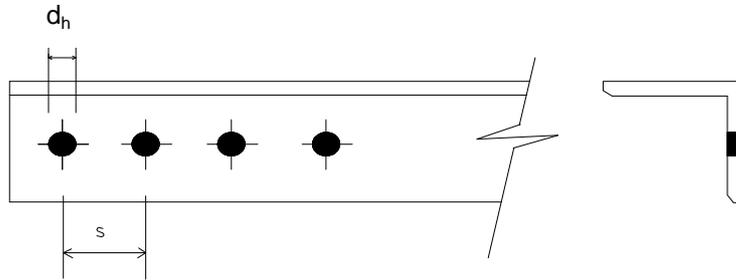


Figura 3.4: Cantoneira simples ligada por apenas uma das abas.

2- Para perfis T, cantoneiras duplas com chapa “gusset” e perfil U, fixados pela alma, tem-se:

$$A_e = A_f + \frac{\sum A_\ell}{2} \quad (3.7)$$

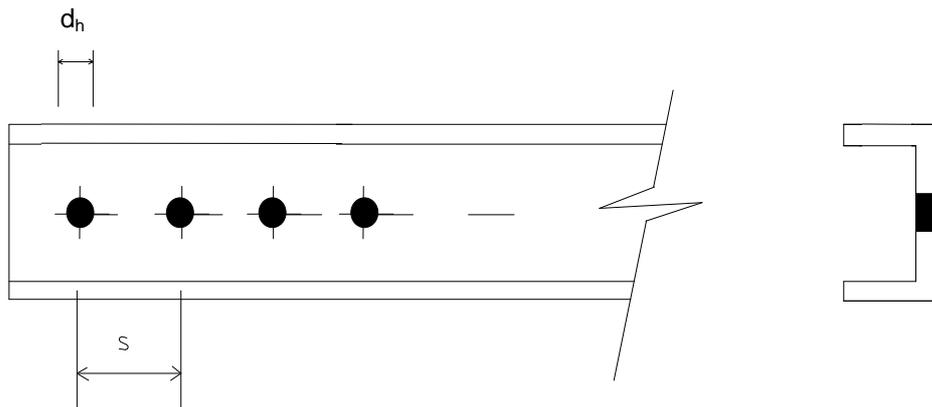


Figura 3.5: Perfil U conectado pela alma.

As considerações apresentadas pela AA com relação à área líquida efetiva de perfis parcialmente conectados, juntamente com as considerações de MARSH (1983) e as especificações do AISC-ASD (1989) podem ser resumidas em um coeficiente que multiplica a área líquida da seção transversal (C_t), que estão apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Comparação entre os valores de C_t para o cálculo da área efetiva.

CASO	AA	AISC	MARSH
cantoneira de abas iguais com 1 aba conectada e com 2 parafusos em linha	0,67	0,75	0,62
dupla cantoneiras de abas iguais com 2 parafusos em linha	0,83	0,75	0,75
cantoneiras de abas iguais com 1 aba conectada e com 3 parafusos em linha	0,67	0,85	0,62
dupla cantoneiras de abas iguais com 3 parafusos em linha	0,83	0,85	0,75
T com a aba conectada	não previsto	0,75 ou 0,85	não previsto

Em perfis submetidos à tração excêntrica, tem-se uma tensão máxima proveniente da combinação do efeito da força normal com o momento fletor devido à excentricidade. O escoamento das fibras mais tracionadas (plastificação) permite um aumento de força em relação ao que uma simples superposição de efeito poderia sugerir. Este fato é

considerado nas expressões anteriores, de modo a combinar os efeitos e não apenas sobrepô-los.

Assim como nos elementos estruturais em aço, é usual também nas estruturas em alumínio limitar a esbeltez dos elementos tracionados para evitar deslocamentos excessivos no caso da incidência de ações laterais ou ainda evitar, principalmente no caso do alumínio, enquanto material leve, vibrações excessivas decorrentes de ações como o vento.

Valores típicos podem ser tomados como:

- 250 para estruturas internas e protegidas, sem risco de vibração, e
- 150 para estruturas externas nas quais pode ocorrer vibração.

MARSH (1983), menciona que se o elemento estiver submetido permanentemente a uma força de tração, o valor máximo admitido para a esbeltez pode ser aumentado pelo seguinte coeficiente:

$$\left(1 + \frac{\sigma}{\sigma_e}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

onde:

σ - menor tensão de tração em serviço,

σ_e - tensão crítica de Euler, dada por:

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (3.9)$$

λ - esbeltez

E - módulo de elasticidade.

Barras delgadas de alumínio tendem a ser muito flexíveis. Deste modo, quando usadas como barras tracionadas, devem ter comprimento suficientemente pequeno para manter a rigidez da estrutura, ou ainda estarem constantemente submetidas a uma significativa força de tração.

Como é usual no tratamento das conexões de estruturas de aço, também nas estruturas em alumínio não é comum considerar a não uniformidade de tensões que ocorre nas seções próximas aos furos das ligações parafusadas. Esta desconsideração pode ser justificada pelo fato das tensões tenderem a uniformizar-se sob grandes deformações, ou seja, nas proximidades da ruína.

Contudo vale destacar que esta não uniformidade de tensões é de significativa importância na resistência à fadiga da peça.

4. Barras Submetidas à Compressão

4.1. Generalidades

As especificações da AA estabelecem que as tensões críticas no caso de barras comprimidas devem ser calculadas em função dos modos de falha da barra (flambagem global) e dos componentes da seção transversal (flambagem local). Em ambos os casos a tensão admissível é obtida dividindo-se a tensão crítica pelo fator de segurança na compressão.

Para as barras comprimidas, tanto na análise global quanto local, o fator de segurança no escoamento $(FS)_y$ é aplicado apenas no escoamento propriamente dito, ou seja, nas barras curtas e de seção compacta. Para os casos de flambagem inelástica ou elástica, ou seja barras medianamente esbeltas ou esbeltas, aplica-se um fator de segurança maior $(FS)_u$.

No caso do escoamento aplica-se ainda um coeficiente de modificação do fator de segurança empregado em algumas ligas e denominado k_c .

A AA estabelece o fator de segurança no escoamento igual a 1,65 e na flambagem igual a 1,95. Estes valores são próximos aos tradicionalmente propostos pelo AISC-ASD: 1,67 para escoamento ($\lambda=0$) e 1,92 flambagem elástica, sendo que na flambagem inelástica calcula-se um valor entre 1,67 e 1,92, em função da esbeltez da barra.

Deste modo tem-se:

$$\begin{array}{l}
 \text{- no escoamento: } \frac{f_{cy}}{k_c (FS)_y} \\
 \text{- na flambagem: } \frac{\sigma_c}{(FS)_u}
 \end{array} \quad (4.1)$$

Onde:

f_{cy} - resistência ao escoamento por compressão,

σ_c - tensão crítica na compressão,

$(FS)_y$ - fator de segurança no escoamento, igual a 1,65,

$(FS)_u$ - fator de segurança na flambagem, igual a 1,95 e

k_c - coeficiente de modificação do fator de segurança 1,12 para a liga 2014-T6 e algumas ligas da série 6000 e 1,1 para todas as outras.

Substituindo os valores para os fatores de segurança $(FS)_y$ e $(FS)_u$ as expressões para cálculo das tensões admissíveis resultam:

$$\frac{f_{cy}}{k_c 1,65} \quad e \quad \frac{\sigma_c}{1,95} \quad (4.2)$$

Assim como nas estruturas de aço, a ruína de uma barra comprimida de alumínio poderá ocorrer por escoamento, flambagem global ou flambagem local das partes (chapas) componentes do perfil.

A falha por escoamento poderá ocorrer nas barras com baixos valores do índice de esbeltez global (λ) e também baixos valores do índice de esbeltez local (relação b/t), isto é, nas barras “curtas” e com seção compacta. Entretanto, na grande maioria dos casos a falha é governada pela flambagem global ou local, podendo ocorrer uma interação entre os dois fenômenos.

A verificação de uma barra de alumínio axialmente comprimida envolve três etapas:

- discretização da seção transversal em elementos, para verificação da flambagem local.
- verificação da flambagem global, considerando o caso geral de instabilidade, ou seja, flambagem por flexo-torção, quando aplicável.
- verificação da interação flambagem global - flambagem local.

4.2. Flambagem em barras sujeitas à compressão centrada

4.2.1. Flambagem Global

O procedimento do AA estabelece três trechos para a curva de flambagem descritos a seguir:

1. escoamento,
2. flambagem inelástica,
3. flambagem elástica.

A figura 4.1 a seguir ilustra esquematicamente estas três situações:

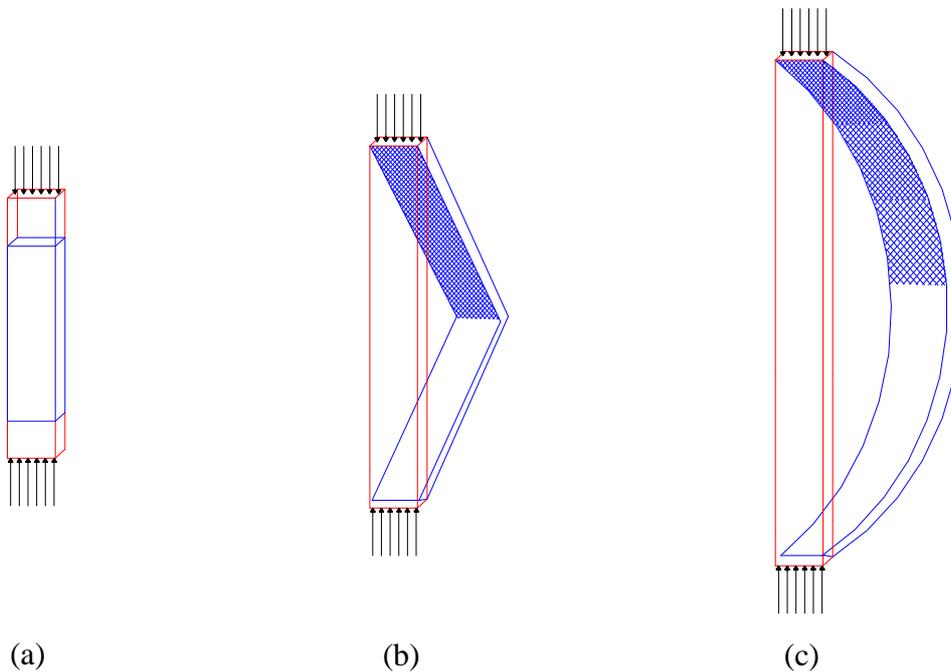


Figura 4.1: Modos de falha por flambagem global: (a) escoamento, (b) flambagem inelástica e (c) flambagem elástica [adaptada de KISSEL & FERRY (1995)].

A classificação das peças comprimidas é função do seu índice de esbeltez (λ) dado por:

$$\lambda = \frac{kL}{r} \quad (4.3)$$

onde:

kL - comprimento efetivo de flambagem e

r - raio de giração .

A resistência de barras esbeltas, isto é, sujeitas à flambagem elástica, é determinada pela expressão de Euler, cuja tensão crítica é dada por:

$$\sigma_c = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (4.4)$$

A flambagem inelástica ocorre quando a tensão crítica de flambagem elástica supera a tensão de proporcionalidade, o que ocorre geralmente em barras de esbeltez intermediária. A avaliação da resistência à compressão com flambagem inelástica foi proposta inicialmente por Engesser, adotando-se a própria expressão de Euler, entretanto o módulo de elasticidade não é mais um valor constante, variando ponto a ponto e sendo denominado módulo tangente (figura 4.2).

Deste modo, a tensão crítica de flambagem inelástica pode ser avaliada por:

$$\sigma_c = \frac{\pi^2 E_t}{\lambda^2} \quad (4.5)$$

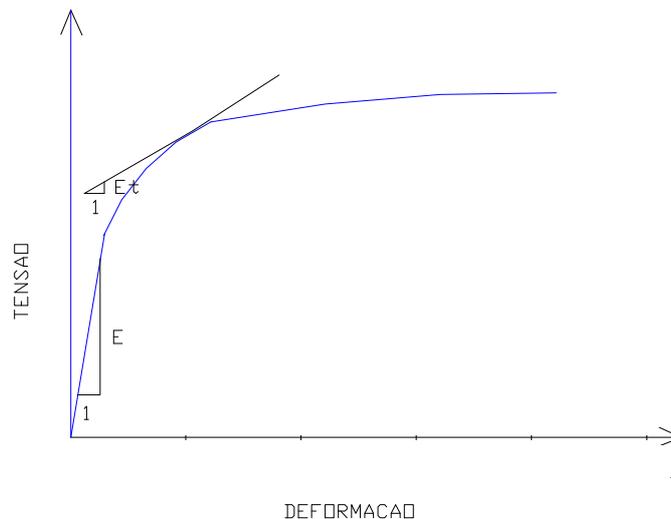


Figura 4.2: Diagrama tensão x deformação: ilustração do módulo tangente.

Como tal procedimento é inviável de ser aplicado em situações práticas, uma vez que o módulo tangente varia ponto a ponto, emprega-se usualmente expressões aproximadas, calibradas experimentalmente, para o trecho de flambagem inelástica.

Na curva de flambagem, a relação entre tensão crítica e esbeltez é dada para a flambagem inelástica por uma aproximação linear, com bons resultados.

$$\sigma_c = B_c - D_c \lambda \quad (4.6)$$

Os valores de B_c e D_c são determinados por meio de expressões que relacionam a resistência ao escoamento por compressão e o módulo de elasticidade, para cada liga e têmpera, e são experimentalmente calibradas.

Como as ligas nas têmperas não envelhecidas artificialmente (O,H,T1 a T4) apresentam comportamento tensão x deformação diferente da liga nas têmperas envelhecidas artificialmente (T5 a T9), figura 4.3, as constantes são determinadas de maneira distinta para estes dois grupos. Deste modo, tem-se:

- para as ligas nas têmperas envelhecidas artificialmente:

$$B_c = \left(1 + \frac{2}{a}\right) f_{cy} \quad (4.7)$$

$$C_c = 4,1 \sqrt{\frac{E}{B_c}} = C_2 \quad (4.8)$$

$$D_c = 0,41 \frac{B_c}{C_c} \quad (4.9)$$

- para as ligas nas têmperas não envelhecidas artificialmente:

$$B_c = \left(1 + \frac{3}{a}\right) f_{cy} \quad (4.10)$$

$$C_c = 5,44 \sqrt{\frac{E}{B_c}} = C_2 \quad (4.11)$$

$$D_c = 0,67 \frac{B_c}{C_c} \quad (4.12)$$

Onde:

$$a = \sqrt{\frac{E}{f_{cy}}} \quad (4.13)$$

E - módulo de elasticidade

f_{cy} - resistência ao escoamento por compressão

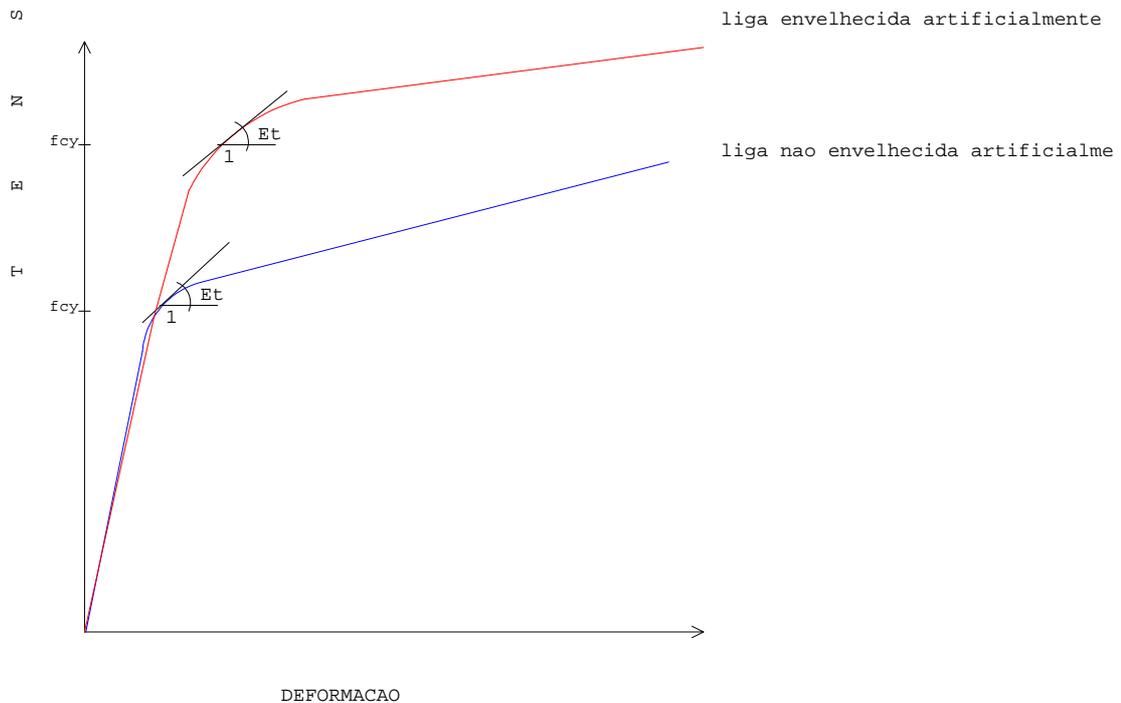


Figura 4.3: Comparação entre as curvas tensão x deformação para as ligas envelhecidas artificialmente e as ligas não envelhecidas artificialmente.

As expressões para o cálculo destas constantes são apresentadas na norma da AA, sendo que, para dimensionamento, estas constantes já se encontram devidamente tabeladas para várias ligas, como por exemplo no ALUMINUM DESIGN MANUAL.

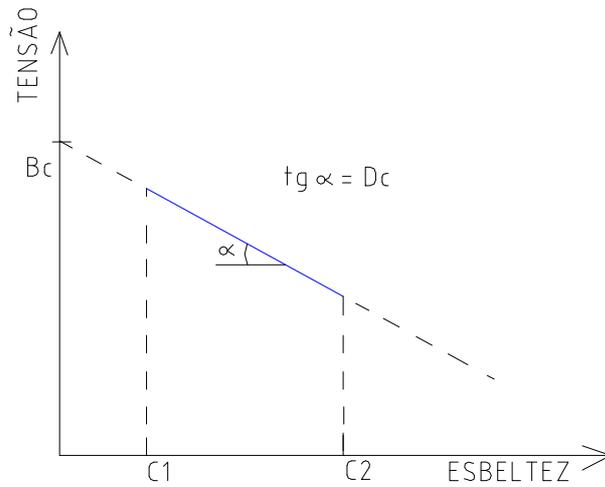


Figura 4.4: Reta da flambagem inelástica

Uma vez estabelecida a reta da flambagem inelástica é possível definir a curva de flambagem, que é constituída por três trechos, delimitados pelos parâmetros C_1 e C_2 :

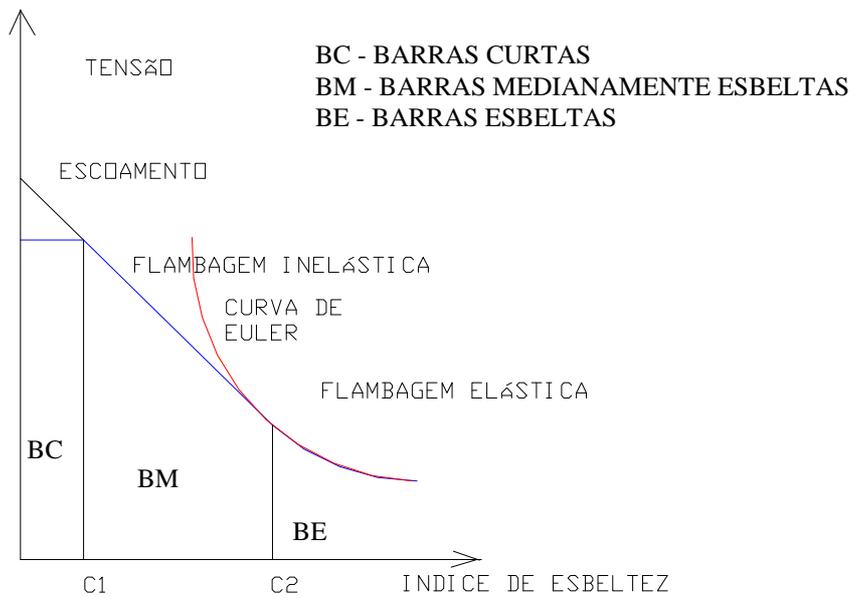


Figura 4.5: Curva de flambagem para barras de alumínio.

A figura 4.5 apresenta também uma classificação para as barras comprimidas em função do índice de esbeltez:

- Barras curtas: apresentam índice de esbeltez inferior ao parâmetro C_1 , ou seja, admitem plastificação sem a ocorrência de flambagem.
- Barras medianamente esbeltas: apresentam índice de esbeltez compreendido entre os parâmetros C_1 e C_2 , correspondem à flambagem no regime inelástico.
- Barras esbeltas: apresentam índice de esbeltez superior ao parâmetro C_2 , correspondem ao regime elástico.

Como ocorre no escoamento de barras tracionadas, também nas barras comprimidas a resistência ao escoamento é reduzida por um fator k_c tabelado na norma da AA como 1,12 para a liga 2014-T6 e algumas ligas da série 6000 e 1,1 para as demais ligas.

$$s_c = \frac{f_{cy}}{k_c} \quad (4.14)$$

A título de ilustração apresenta-se o procedimento de construção das curvas de flambagem para a liga 6351, nas têmperas T4 e T6, cujos valores da resistência ao escoamento por compressão e módulo de elasticidade para cada uma das têmperas estão relacionados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores de resistência ao escoamento por compressão e módulo de elasticidade para a liga 6351.

Propriedade	Liga 6351-T4	Liga 6351-T6
f_{cy} (kN/cm ²)	13,4	26,0
E (kN/cm ²)	7.000	7.000

O primeiro trecho refere-se à própria resistência ao escoamento dividida pelo fator de redução k_c , que para a liga 6351 é igual a 1,12.

O segundo trecho corresponde à flambagem inelástica, cuja reta é definida pela expressão 4.6 com os parâmetros calculados pelas expressões 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13, os quais estão indicados na tabela 4.2.

O terceiro e último trecho corresponde à flambagem elástica, dado pela expressão de Euler (expressão 4.4). As curvas nesse trecho são coincidentes para as duas tâmporas, uma vez que o módulo de elasticidade assume o mesmo valor.

A tabela 4.3 apresenta um resumo das expressões e dos valores limites C_1 e C_2 referentes à curva de flambagem para as duas tâmporas.

Tabela 4.2: Parâmetros para determinação da expressão de flambagem inelástica.

Parâmetro	Liga 6351-T4	Liga 6351-T6
a	22,85	16,41
B_c (kN/cm ²)	15,16	29,17
$C_c = C_2$	116,9	63,51
D_c (kN/cm ²)	0,087	0,19

Tabela 4.3: Tensões admissíveis de flambagem (em kN/cm²) da liga 6351 nas têmperas T4 e T6.

Trecho do Diagrama de Flambagem	Liga 6351-T4	Liga 6351-T6
Escoamento (expressão 4.14)	$\sigma_a = 7,25$ $C_1 = 11,5$ ($p/k_c = 1,12$)	$\sigma_a = 14,1$ $C_1 = 9,7$ ($p/k_c = 1,12$)
Flambagem Inelástica (expressão 4.6)	$\sigma_a = 7,77 - 0,045\lambda$ $C_2 = 117$	$\sigma_a = 15 - 0,096\lambda$ $C_2 = 63,5$
Flambagem Elástica (expressão 4.4)	$\sigma_a = \frac{3,54 \times 10^4}{\lambda^2}$	$\sigma_a = \frac{3,54 \times 10^4}{\lambda^2}$

Traçando-se as curvas em um gráfico de tensão admissível x esbeltez tem-se a curva de flambagem para as duas têmperas (figura 4.6).

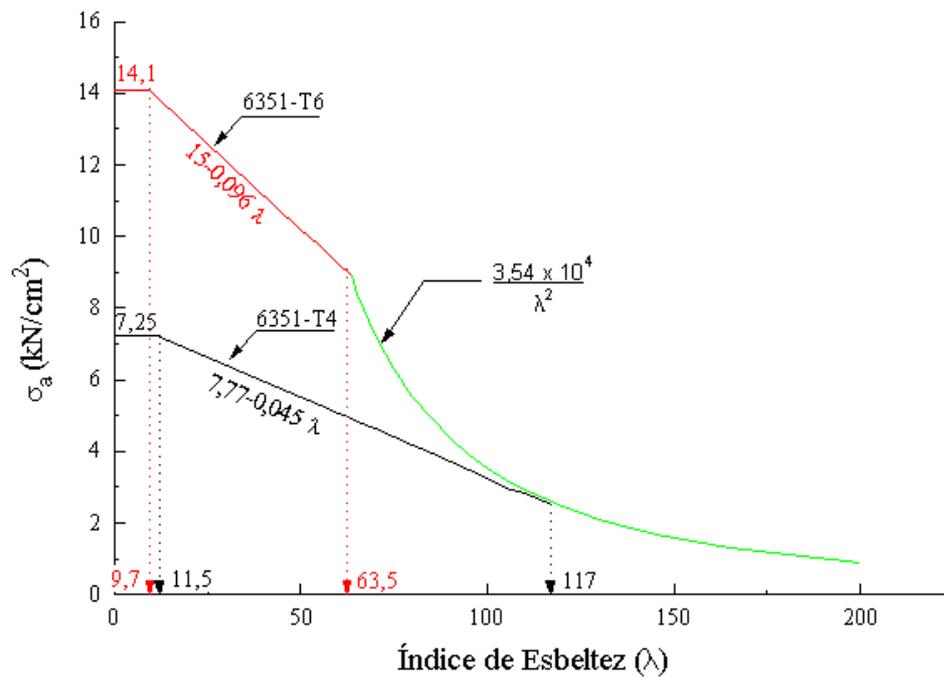


Figura 4.6: Curva de flambagem para a liga 6351 nas temperaturas T4 e T6.

A figura 4.7 apresenta a comparação entre as curvas de flambagem para a liga 6351 na temperatura T6 e para o aço ASTM-A36. Nota-se que para fins comparativos a curva para o aço foi construída utilizando-se os valores de módulo de elasticidade e resistência ao escoamento na compressão da liga 6351 temperatura T6.

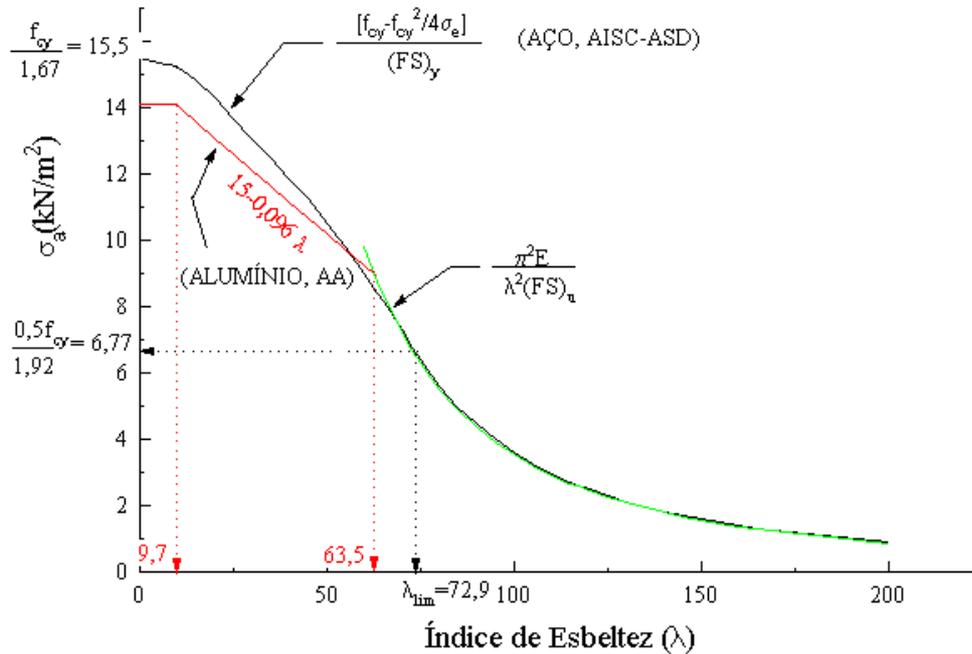


Figura 4.7: Curva de flambagem para a liga 6351 na têmpera T6 e aço ASTM-A36.

Em se tratando de seções abertas e de paredes delgadas, o caso geral de instabilidade deve ser verificado (flambagem por flexo-torção).

Nestes casos as especificações da AA apresentam o conceito de esbeltez equivalente para as seções monossimétricas - flambagem por flexo-torção, ou seções duplamente simétricas - flambagem por torção. Entretanto estas especificações não apresentam um método de determinação da esbeltez equivalente para seções assimétricas.

A tabela 4.4 apresenta um resumo dos modos de flambagem que podem ocorrer em função do tipo da seção transversal.

Tabela 4.4: Modos de flambagem global em barras sob compressão centrada.

SEÇÃO	flambagem por flexão	flambagem por torção	flambagem por flexo-torção
fechada	sim	não	não
duplamente simétrica	sim	sim	não
monossimétrica	sim (em torno do eixo de não simetria)	não	sim
assimétrica	não	não	sim

Para a flambagem por torção, a norma da AA apresenta o cálculo da esbeltez equivalente pela expressão 4.15.

$$\lambda_{\phi} = \sqrt{\frac{Ar_0^2}{0,038I_t + [C_w/(k_{\phi}L)^2]}} \quad (4.15)$$

Onde:

λ_{ϕ} - índice de esbeltez equivalente para flambagem por torção

A - área da seção transversal

r_0 - raio polar de giração da seção transversal em relação ao centro de torção, dado pela expressão 4.16.

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)} \quad (4.16)$$

x_0 e y_0 - distância entre o centróide e o centro de torção, nas direções dos eixos principais x e y, respectivamente

r_x e r_y - raios de giração da seção transversal para os eixos principais de inércia

I_t - momento de inércia à torção

C_w - constante de empenamento

k_ϕ - coeficiente para cálculo do comprimento efetivo à torção da barra

L - comprimento livre da barra à torção

No caso da flambagem por flexo-torção, o índice de esbeltez equivalente é dado pela resolução, por tentativas da seguinte expressão:

$$\left[1 - \left(\frac{\lambda_{FT}}{\lambda_y} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{\lambda_{FT}}{\lambda_x} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{\lambda_{FT}}{\lambda_\phi} \right)^2 \right] - \left(\frac{y_0}{r_0} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{\lambda_{FT}}{\lambda_x} \right)^2 \right] - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{\lambda_{FT}}{\lambda_y} \right)^2 \right] = 0 \quad (4.17)$$

Onde:

λ_{FT} - índice de esbeltez para flambagem por flexo-torção

λ_x, λ_y - índice de esbeltez efetivo na flambagem por flexão em relação aos eixos x e y, respectivamente

r_0 - raio polar de giração da seção transversal em relação ao centro de torção, dado pela expressão 4.16.

x_0 e y_0 - raios de giração da seção transversal para os eixos principais de inércia

A resolução da expressão 4.17 por tentativas pode ser complicada, deste modo sugere-se a determinação da tensão na flexo-torção, caso geral, (σ_{FT}) e a partir desta obtém-se o índice de esbeltez equivalente na flexo-torção (λ_{FT}), analogamente ao procedimento empregado nas normas de aço.

Para o caso geral de instabilidade tem-se:

$$\bar{\lambda}_{eq} = \sqrt{\frac{f_{cy}/k_c}{\sigma_{FT}}} \quad (4.17)$$

onde,

$\bar{\lambda}_{eq}$ - índice de esbeltez equivalente para a flambagem por flexo-torção

σ_{FT} - tensão crítica de flambagem por flexo-torção

Na plastificação tem-se:

$$\lambda_{pl} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{f_{cy}/k_c}} \quad (4.18)$$

onde,

λ_{pl} - índice de esbeltez na plastificação

O índice de esbeltez na flexo-torção será dado por

$$\bar{\lambda}_{eq} = \frac{\lambda_{eq}}{\lambda_{pl}} \Rightarrow \lambda_{eq} = \bar{\lambda}_{eq} \times \lambda_{pl} \quad (4.19)$$

$$\lambda_{FT} = \lambda_{eq} = \sqrt{\frac{f_{cy}/k_c}{\sigma_{FT}}} \times \frac{\pi^2 E}{f_{cy}/k_c} \Rightarrow \lambda_{FT} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{FT}}} \quad (4.20)$$

Sendo σ_{FT} a tensão na flexo-torção e dada pela expressão 4.21.

$$\sigma_{FT} = \left[(\sigma_{ex} \sigma_{ey} + \sigma_{ex} \sigma_t + \sigma_{ey} \sigma_t) - \left(\sqrt{(\sigma_{ex} \sigma_{ey} + \sigma_{ex} \sigma_t + \sigma_{ey} \sigma_t)^2 - 4(\sigma_{ex} \sigma_{ey} \sigma) (\gamma \sigma_{ex} + \beta \sigma_{ey} + \sigma_t)} \right) \right] \times \left[\frac{1}{2(\gamma \sigma_{ex} + \beta \sigma_{ey} + \sigma_t)} \right] \quad (4.21)$$

Onde,

σ_{ex} , σ_{ey} - tensões críticas de flambagem elástica por flexão em torno dos eixos x e y, respectivamente

σ_t - tensão crítica de flambagem elástica por torção

β , γ - parâmetros definidos a seguir:

$$\beta = 1 - (x_0 / r_0)^2$$

$$\gamma = 1 - (y_0 / r_0)^2$$

A expressão 4.21 vale para todas as seções, podendo ser simplificada, no caso das seções monossimétricas, pela expressão 4.22.

$$\sigma_{FT} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta \sigma_{ex} \sigma_t} \right] \quad (4.22)$$

4.2.2. Flambagem Local

O outro caso de instabilidade que deve ser verificado é a flambagem local, na qual a seção transversal da barra é subdividida em elementos, como já foi citado anteriormente.

Estes elementos são tratados como elementos bidimensionais, onde em geral tem-se chapa longa, ou seja, o comprimento é muito maior que a largura. Portanto, na análise da flambagem local, considera-se a largura e a espessura da chapa, além das vinculações das bordas.

A norma da AA descreve três tipos de vinculações:

- borda apoiada,
- borda livre, e
- borda enrijecida (apoiada em enrijecedor de borda)

Os casos de vinculações previstos na norma da AA abrange as seções transversais mais usuais, sendo:

1. Elementos planos:

- uma borda apoiada: - outra borda livre
 - outra borda enrijecida
- ambas as bordas apoiadas: - sem enrijecedores intermediários
 - com enrijecedores intermediários

2. Elementos curvos:

- elementos com bordas apoiadas

Estes casos estão ilustrados na figura 4.8.

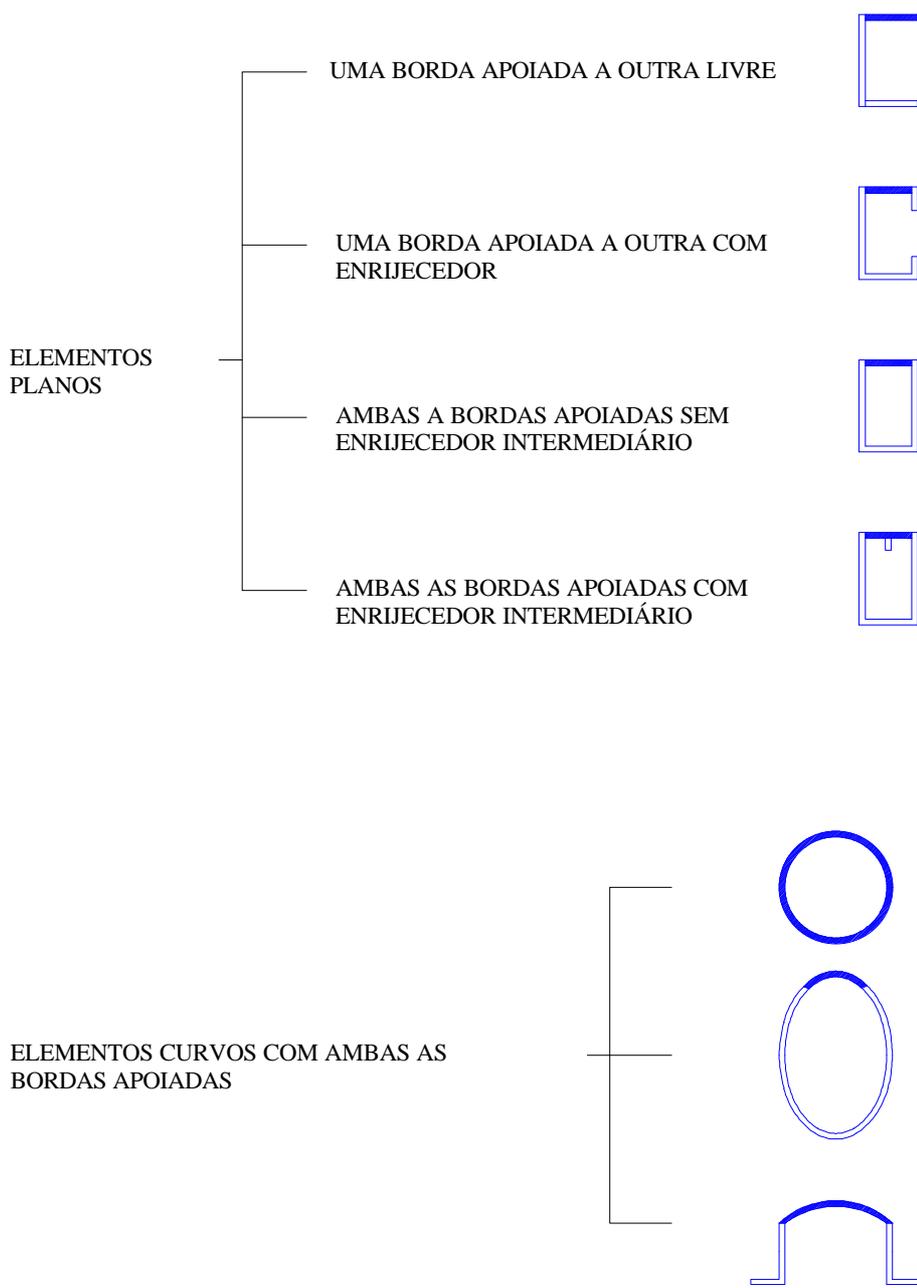


Figura 4.8: Casos de vinculações de chapas

KISSEL & FERRY (1995) descrevem três casos de flambagem local, em função da esbeltez do elemento (relação largura - espessura b/t): escoamento, flambagem local no regime inelástico e flambagem local no regime elástico. Os fatores de segurança são os mesmos da flambagem global : 1,65 para o escoamento e 1,95 para a flambagem. Para o caso de vigas a AA recomenda fator de segurança igual a 1,65 para escoamento e flambagem.

Os três trechos da curva de flambagem são apresentados na figura 4.9, e resumem a determinação das tensões admissíveis no caso de flambagem local.

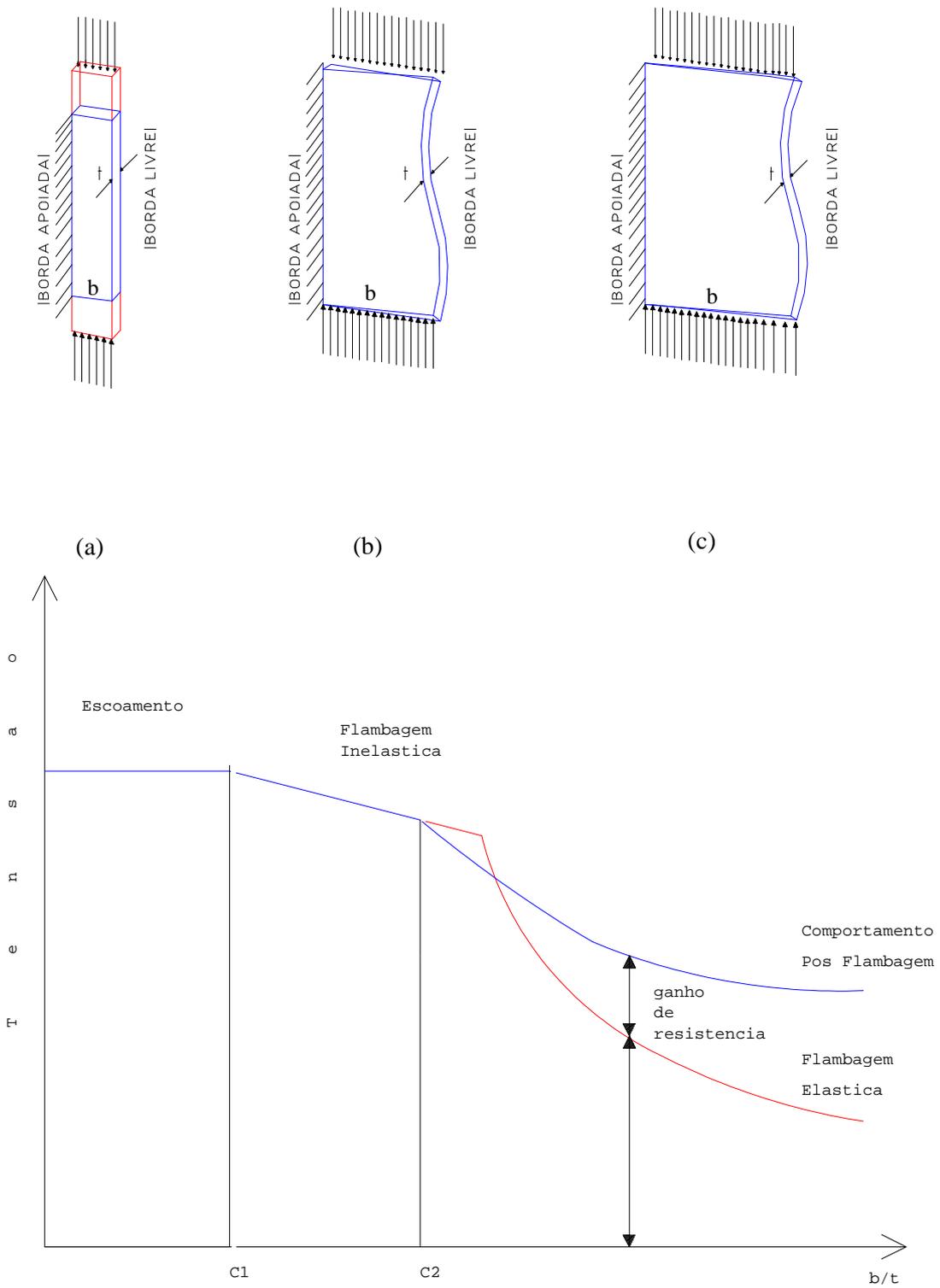
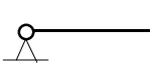
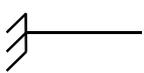
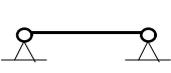
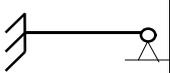
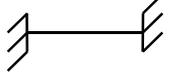


Figura 4.9: Casos de flambagem local em chapas: (a) escoamento, (b) flambagem inelástica e (c) flambagem elástica.

As expressões usadas para o cálculo da flambagem local são similares às empregadas no cálculo da flambagem global, sendo a esbeltez global (kL/r) substituída pela esbeltez do local (b/t), multiplicada pelo fator α .

O fator α , multiplicando a relação largura - espessura, considera a vinculação do elemento e a distribuição de tensões. Por exemplo, uma chapa sujeita a uma tensão de compressão uniforme, com suas duas bordas apoiadas, paralelas à direção das tensões, possui α igual a 1,6, enquanto que uma chapa apoiada em apenas uma das bordas e a outra livre tem α igual a 5,1 (tabela 4.5).

Tabela 4.5: Valores teóricos de k e α para alguns casos de vinculação e solicitação em chapas longas.

Casos	Condições de Vinculação				
					
Compressão Uniforme	$k = 0,43$ $\alpha = 5,1$	$k = 1,28$ $\alpha = 2,89$	$k = 4,00$ $\alpha = 1,6$	$k = 5,42$ $\alpha = 1,4$	$k = 6,97$ $\alpha = 1,24$
Flexão Simétrica	-	-	$k = 23,9$ $\alpha = 0,67$	-	$k = 41,8$ $\alpha = 0,51$
Cisalhamento Puro	-	-	$k = 5,34$ $\alpha = 1,41$	-	$k = 8,98$ $\alpha = 1,09$

O fator α pode ser facilmente obtido da clássica expressão da tensão crítica de flambagem local elástica (4.23).

$$\sigma_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)\left(\frac{b}{t}\right)^2} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{\alpha b}{t}\right)^2} \quad (4.23)$$

$$\alpha = 3,27 / \sqrt{k} \quad (4.24)$$

É possível atribuir para a flambagem local tratamento análogo ao da flambagem global, assim a tensão crítica de flambagem local pode ser determinada da seguinte maneira:

- escoamento:

$$\sigma_c = \frac{f_{cy}}{k_c} \quad (4.25)$$

- flambagem inelástica:

$$s_c = B_p - D_p \left(\frac{ab}{t} \right) \quad (4.26)$$

onde:

b/t - é a relação largura - espessura

B_p e D_p - constantes definidas para cada liga e têmpera.

α - fator que expressa a condição de vinculação da chapa.

- flambagem elástica:

$$s_c = \frac{p^2 E}{\left(\frac{ab}{t} \right)^2} \quad (4.27)$$

Deve-se atentar para o fato da AA considerar como largura de um elemento apenas a parte plana deste elemento, o que difere da consideração do AISC. No caso de elementos com espessura variável adota-se, de maneira análoga ao aço, uma espessura média (figura 4.10).

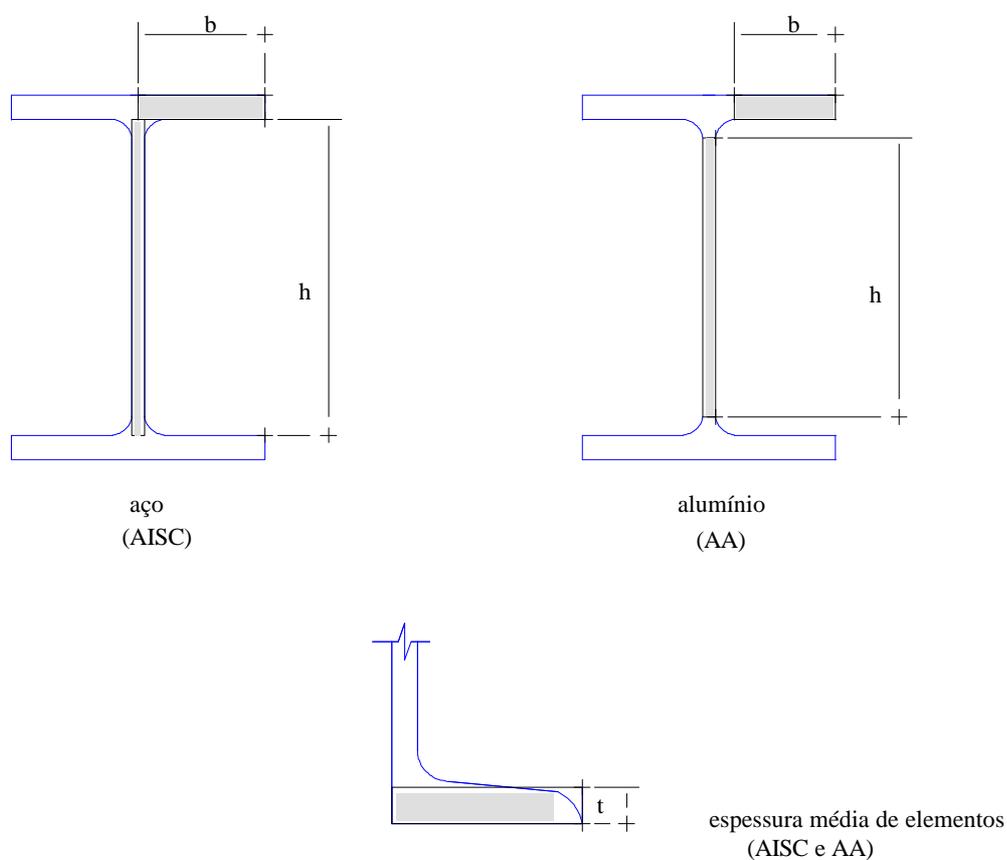


Figura 4.10: Determinação da largura dos elementos segundo AISC e AA.

Existem determinadas situações em que a AA permite a consideração do comportamento pós-flambagem na flambagem local como ilustra a tabela 4.5.

Tabela 4.6: Comportamento pós-flambagem em elementos comprimidos segundo a AA.

Tipo de Elementos	Comportamento Pós-Flambagem
elementos planos com apenas uma borda apoiada (flambagem em relação ao eixo de simetria)	SIM
elementos planos com apenas uma borda apoiada (flambagem em relação ao eixo de não simetria)	NÃO
elementos planos com uma borda apoiada e a outra com enrijecedor	SIM
elementos planos com ambas as bordas apoiadas	SIM
elementos planos com ambas as bordas apoiadas e com enrijecedor intermediário	NÃO
elementos curvos com ambas as bordas apoiadas	NÃO

Nos elementos em que é permitido considerar o comportamento pós-flambagem existe um ganho de resistência do elemento e a expressão 4.27 é modificada para:

$$s_c = \frac{k_2 \sqrt{B_p E}}{\left(\frac{ab}{t}\right)} \quad (4.28)$$

A constante k_2 é determinada para cada liga. Por exemplo, para a liga 6061-T6 seu valor é igual a 2,27.

A figura 4.11 ilustra este comportamento, com as expressões para a liga 6061-T6, no caso de uma chapa com uma das bordas livre.

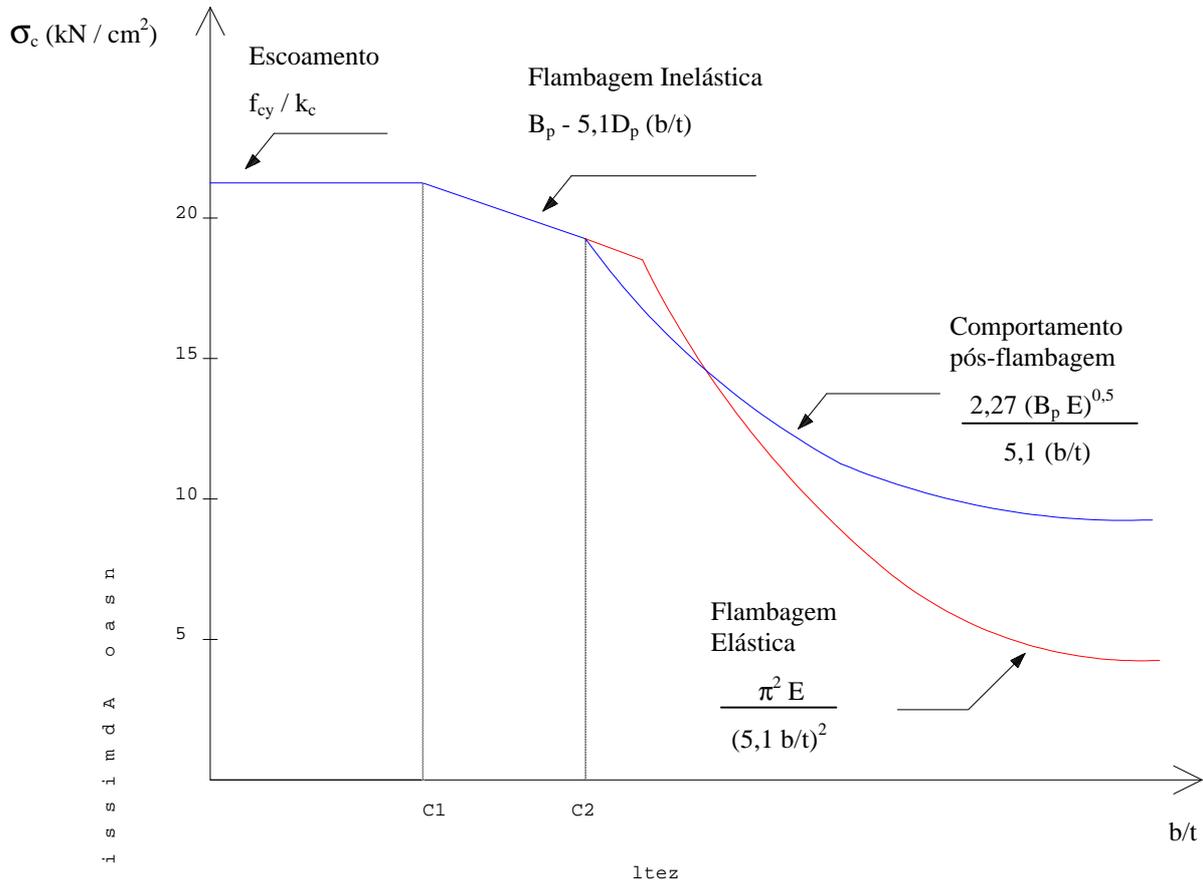


Figura 4.11: Curva de flambagem local para elemento na liga 6061-T6, no caso de uma chapa com uma das bordas livre.

A norma da AA permite ainda, que após o cálculo das tensões admissíveis à flambagem local de cada elemento que formam a seção transversal, calcule-se uma tensão admissível média dada pela expressão 4.29, que será a tensão admissível à flambagem local para a barra comprimida.

$$\sigma_{ca} = \frac{A_1 \sigma_{c1} + A_2 \sigma_{c2} + \dots + A_n \sigma_{cn}}{A} \tag{4.29}$$

Onde:

A_i - área do elemento i ,

σ_{ci} - tensão admissível à flambagem local para o elemento i ,

A - área da seção transversal ($= A_1 + A_2 + \dots + A_n$), e

σ_{ca} - tensão admissível média à flambagem local.

4.2.2.1 Elementos com enrijecedores de borda

Assim como nos perfis de aço formados a frio, é usual em alumínio empregar perfis com enrijecedores de borda nas mesas (perfis U enrijecidos, por exemplo, figura 4.12). Os enrijecedores de borda conferem um vínculo à borda livre da chapa, cuja eficiência, evidentemente, depende de sua “rigidez”. Se a rigidez for elevada, a chapa terá comportamento próximo de uma chapa apoiada em ambas as extremidades. Por outro lado, se o enrijecedor apresentar baixa rigidez a chapa se comportará como uma chapa apoiada apenas em uma borda.

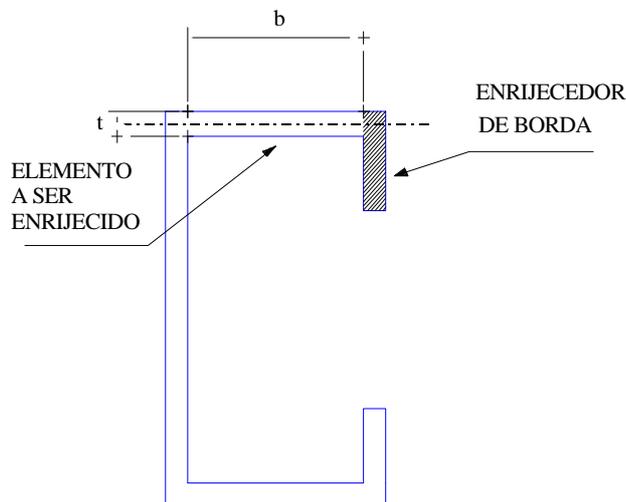


Figura 4.12: Perfil U com mesas enrijecidas por enrijecedores de borda.

A norma da AA apresenta uma expressão para o cálculo da tensão admissível à flambagem local de elementos com enrijecedores de borda (4.30). É importante lembrar também que o enrijecedor de borda também deve ser verificado, calculando-se sua tensão admissível a flambagem local.

$$\sigma_{as} = \sigma_{uT} + (\sigma_{sT} - \sigma_{uT})R \quad (4.30)$$

Onde:

σ_{as} - tensão admissível à flambagem local do elemento com enrijecedor de borda;

σ_{uT} - tensão admissível à flambagem local admitindo o elemento apoiado com borda livre (sem enrijecedor de borda);

σ_{sT} - tensão admissível à flambagem local admitindo o elemento apoiado em ambas as bordas;

R - é o parâmetro que depende da rigidez do enrijecedor de borda e da esbeltez do elemento a ser enrijecido, dado por:

$$R = 1,0 \quad \text{se } b/t \leq S/3 \quad (4.31)$$

$$R = \frac{r_s}{9t \left(\frac{b/t}{S} - \frac{1}{3} \right)} \leq 1,0 \quad \text{se } S/3 < b/t \leq S \quad (4.32)$$

$$R = \frac{r_s}{1,5t \left(\frac{b/t}{S} + 3 \right)} \leq 1,0 \quad \text{se } S < b/t \leq 2S \quad (4.33)$$

Sendo:

r_s - raio de giração do enrijecedor em relação à linha esqueleto (espessura média) do elemento a ser enrijecido;

b, t - largura e espessura, respectivamente, do elemento a ser enrijecido;

$$S = 1,28 \sqrt{\frac{E}{f_{cy}}} \quad (4.34)$$

Os enrijecedores de borda dos perfis tabelados, em geral apresentam baixa eficiência, como é possível comprovar no exemplo a seguir.

Seja o perfil U enrijecido apresentado na figura 4.13, com as seguintes propriedades geométricas.

$$A = 5,22 \text{ cm}^2$$

$$I_x = 93,97 \text{ cm}^4$$

$$I_y = 13,92 \text{ cm}^4$$

$$r_x = 4,24 \text{ cm}$$

$$r_y = 1,63 \text{ cm}$$

$$W_x = 17,56 \text{ cm}^3$$

$$W_y = 4,16 \text{ cm}^3$$

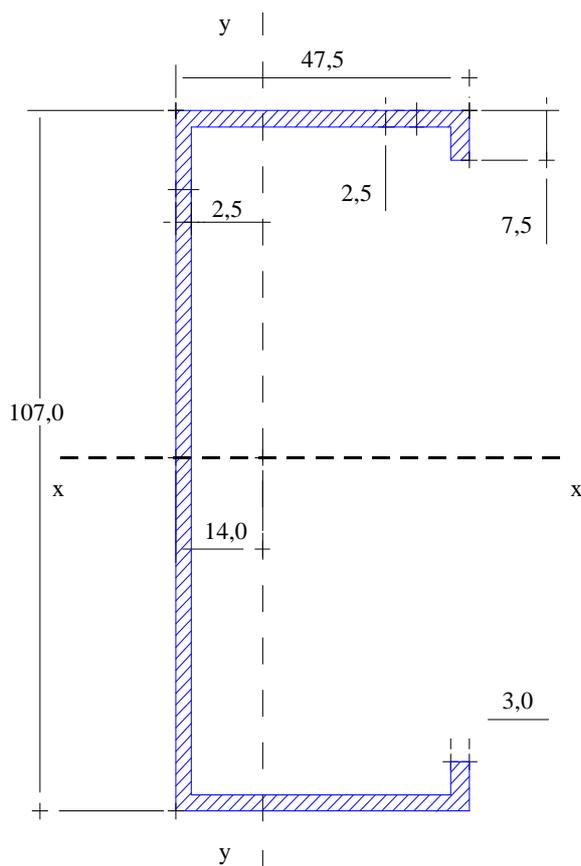
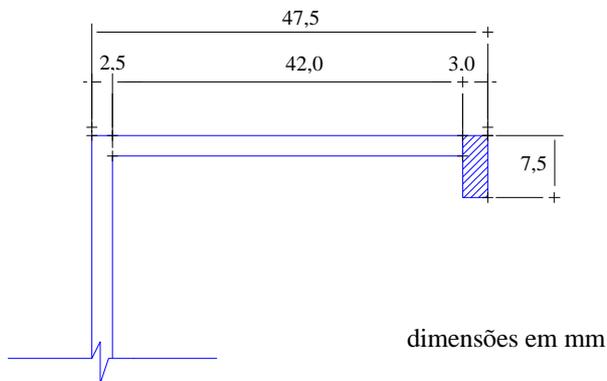


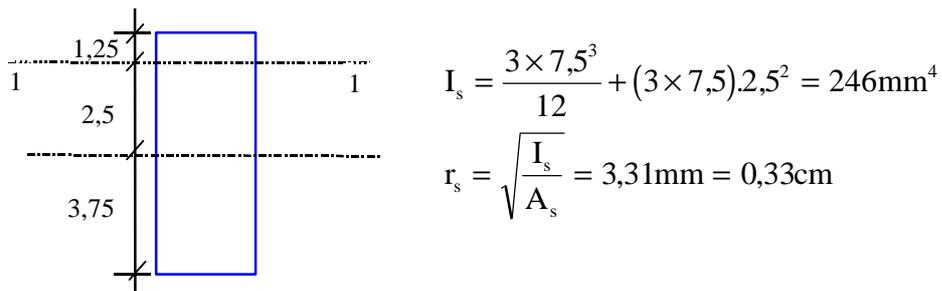
Figura 4.13: Perfil U enrijecido disponível comercialmente (dimensões em mm), adotado no exemplo.

Inicialmente calcula-se a esbeltez do elemento a ser enrijecido e do enrijecedor:



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{mesa} \Rightarrow \frac{b}{t} = \frac{42}{2,5} = 16,8 \\ \text{enrijecedor} \Rightarrow \frac{b}{t} = \frac{7,5}{3} = 2,5 < C_1 = 5,2 \text{ (compacto)} \end{array} \right.$$

Determina-se o momento de inércia e o raio de giração do enrijecedor em relação a linha esqueleto do elemento a ser enrijecido (1-1):



No caso da liga 6061-T6 tem-se da expressão 4.34:

$$S = 1,28 \sqrt{\frac{7.000}{25}} = 16,7$$

$$\frac{b}{t} = 16,8 \approx S$$

cálculo de "R" pela expressão 4.32:

$$R = \frac{3,31}{9 \times 2,5 \left(1 - \frac{1}{3}\right)} = 0,221 < 1,0$$

As tensões admissíveis à flambagem local para a mesa com uma das bordas livre (σ_{uT}) e com as duas bordas apoiadas (σ_{sT}), resultam:

$$\sigma_{uT} = \frac{106}{b/t} = 6,37 \text{ kN / cm}^2$$

$$\sigma_{sT} = 16 - 0,174(b/t) = 13,12 \text{ kN / cm}^2$$

Calcula-se a seguir, a tensão admissível à flambagem local para a mesa considerando a contribuição do enrijecedor:

$$\sigma_{as} = 6,37 + (13,12 - 6,37)0,221 = 6,37 + 1,49$$

$$\sigma_{as} = 7,86 \text{ kN/cm}^2$$

Observa-se que, em comparação com a mesa com borda livre, houve um ganho de resistência de 23% , que corresponde a 60% do valor da tensão admissível no caso de elemento com as duas bordas apoiadas.

$$\frac{7,86}{6,37} = 1,23$$

$$\frac{7,86}{13,12} = 0,6$$

Para que o enrijecedor seja totalmente eficiente é necessário que ele constitua apoio para a mesa, sem apresentar flambagem local.

Com base neste conceito buscou-se a largura do enrijecedor para a qual o parâmetro R tenha valor máximo, igual a 1.

$$R = \frac{r_s}{9 \times t \left(\frac{b/t}{s} - \frac{1}{3} \right)} = 1,0 \Rightarrow r_s = 15 \text{ mm}$$

Admitindo o momento de inércia do enrijecedor como:

$$I_s = \frac{t_s h_s^3}{3} \text{ tem-se:}$$

$$r_s = 15\text{mm} = \sqrt{\frac{I_s}{A_s}} = \sqrt{\frac{t_s h_s^3}{3}} = \frac{h_s}{3} \Rightarrow h_s = 26\text{mm}$$

Porém, a esbeltez do enrijecedor resulta:

$$\frac{b}{t} = \frac{26}{3} = 7,8$$

Comparando-se este valor com os índices de esbeltez limite para a liga 6061-T6:

$$\left. \begin{array}{l} C_1 = 5,2 \\ C_2 = 10 \end{array} \right\} \therefore C_1 < \left(\frac{b}{t}\right)_s < C_2$$

Para o enrijecedor que apresenta uma das bordas livre a tensão admissível à flambagem local será dada por:

$$\sigma_a = 16,03 - 0,544 \left(\frac{b}{t}\right) = 11,76 \text{ kN/cm}^2$$

Este valor de tensão em comparação com a tensão admissível no caso de escoamento implica em uma redução de 11% na capacidade do próprio enrijecedor:

$$\frac{11,76}{13,2} = 0,89 \Rightarrow (\text{redução de } 11\%)$$

4.2.2.2 Flambagem local de tubos de seção circular

Outro caso importante a ser abordado é a flambagem de tubos de seção circular, muito empregado em treliças espaciais. A AA prevê este caso, ilustrado na figura 4.14 para a liga 6061-T6.

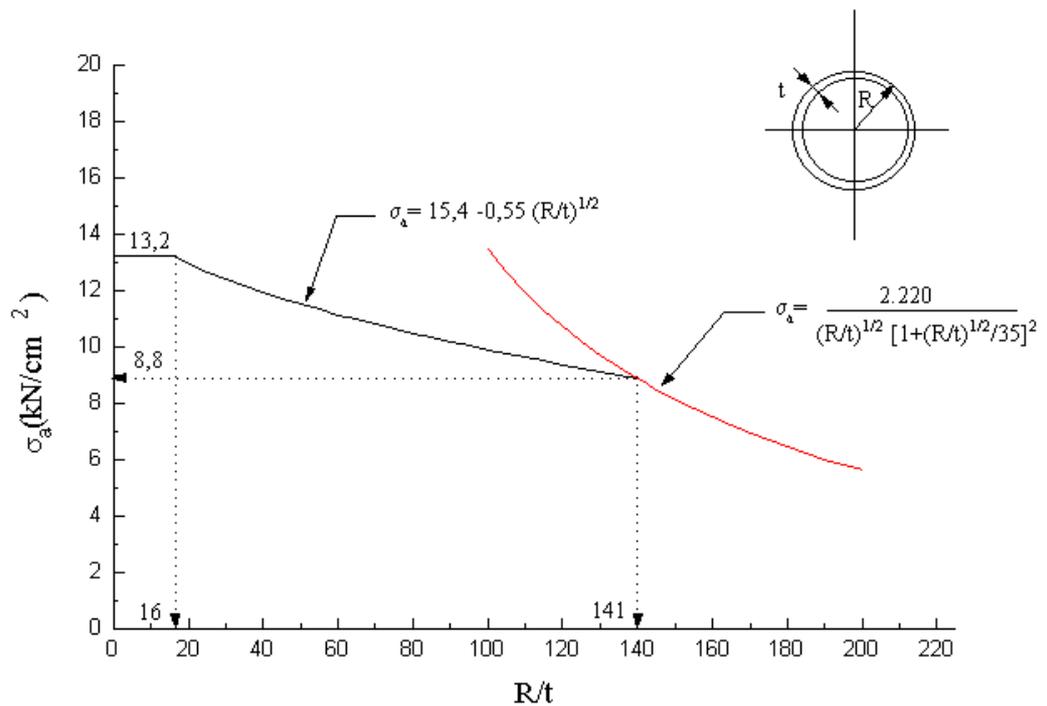


Figura 4.14: Curva de flambagem local, em tensões admissíveis, para tubos de seção circular - Liga 6061-T6.

4.2.3. Interação entre flambagem global e flambagem local

Nos casos em que a seção é constituída por elementos esbeltos, ou seja, a relação b/t é superior a C_2 , o comportamento pós-flambagem que implica em aumento da tensão nas extremidades vinculadas dos elementos, pode constituir-se num fator redutor da capacidade da barra em termos de flambagem global.

Quando a flambagem local é analisada por meio de uma seção efetiva, ou seja, desprezando-se partes da seção, e conseqüentemente tornando-se uma nova seção, menor que a real, a interação entre a flambagem global e a flambagem local já é considerada na determinação da capacidade da barra.

Esse procedimento tem sido adotado pelas últimas edições das normas do AISI (perfis de aço formados a frio), onde a flambagem local é assimilada à uma largura efetiva para qualquer tipo de vinculação do elemento.

Entretanto, o procedimento da AA prevê verificações isoladas para os dois modos de flambagem, com o cálculo independente das tensões admissíveis. Se a tensão admissível à flambagem local for menor que a tensão admissível a flambagem global, havendo então a possibilidade de redução da capacidade da barra pela interação entre os dois modos de flambagem, deve-se calcular uma tensão admissível reduzida ($\sigma_{a,r}$) dada pela expressão (4.35).

$$\sigma_{a,r} = \frac{\sigma_{cg}^{1/3} \cdot \sigma_{cl}^{1/3}}{FS} \quad (4.35)$$

Onde:

σ_{cg} - tensão crítica da flambagem global,

σ_{cl} - tensão crítica de flambagem local,

FS - fator de segurança aplicado à flambagem (1,95 para barras comprimidas e 1,65 para barras fletidas)

A expressão 4.28 é aplicável somente se a seção possuir elementos esbeltos ($b/t > C_2$), e se $\sigma_{cl}/FS < \sigma_{cg}/FS$.

5. Barras Submetidas à Flexão Simples

Quando uma barra está submetida a flexão, sua capacidade está relacionada com a sua resistência ao momento fletor e à força cortante. Para estes esforços têm-se diferentes modos de ruína aplicáveis.

Com relação ao momento fletor, os modos de ruína aplicáveis são: plastificação ou ruptura da região tracionada, as instabilidades locais (mesa comprimida e alma) e a instabilidade global (flambagem lateral com torção). Para a força cortante poderá ocorrer um estado de plastificação ou de instabilidade da alma.

Além dos modos de ruína anteriormente relacionados, é necessário verificar também a condição de serviço (utilização), como deslocamentos excessivos (flechas) e vibrações. É importante lembrar que a flecha é inversamente proporcional ao módulo de elasticidade do material e o alumínio apresenta módulo de elasticidade da ordem de um terço do módulo de elasticidade do aço, o que muitas vezes condiciona o dimensionamento das barras fletidas.

BRIMELOW (1971) recomenda limitar os valores das flechas em 1/180 do vão para terças e longarinas, e em 1/325 do vão para as vigas em geral. Estes valores são próximos dos usualmente empregados no projeto de vigas de aço.

5.1. Momento Fletor: Vigas estáveis lateralmente e de seção compacta

A verificação da região tracionada das vigas é similar à verificação das barras tracionadas (capítulo 3), onde a máxima tensão de tração calculada para a seção transversal líquida da viga não deve superar a tensão admissível ao escoamento ou à ruptura ($f_{ty} / 1,65$ ou $f_{tu} / (k_t 1,95)$).

De maneira análoga ao previsto no AISC-ASD (1989), a tensão admissível ao escoamento pode ser majorada para levar em consideração a plastificação da seção, conforme apresentado na tabela 5.1 e ilustrada na figura 5.1.

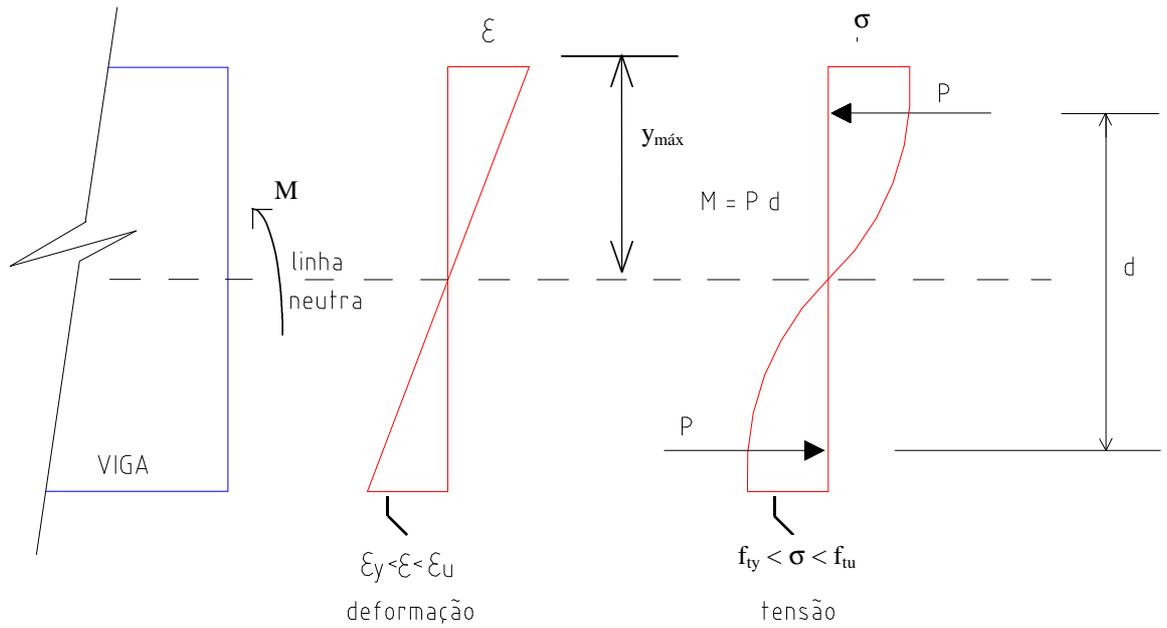


Figura 5.1: Distribuição das deformações e tensões na flexão.

Tabela 5.1: Comparação entre os valores de tensão admissível ao escoamento na tração para diferentes seções transversais de aço e alumínio.

SEÇÃO	TENSÃO ADMISSÍVEL	
	AÇO (AISC-ASD)	ALUMÍNIO (AA)
I e U fletidos em relação ao eixo de maior inércia	$0,66 f_y = 1,1 (0,6) f_y$	$0,6 f_{ty} = f_{ty} / 1,65$
I fletidos em relação ao eixo de menor inércia e barras maciças	$0,75 f_y = 1,25 (0,6) f_y$	$0,79 f_{ty} = (1,3 / 1,65) f_{ty}$
tubos retangulares	$0,66 f_y = 1,1 (0,6) f_y$	$0,6 f_{ty} = f_{ty} / 1,65$
tubos circulares	$0,66 f_y = 1,1 (0,6) f_y$	$0,71 f_{ty} = (1,17 / 1,65) f_{ty}$

A tabela 5.2 apresenta um resumo das tensões admissíveis à tração e à compressão em vigas de alumínio.

Tabela 5.2: Tensão admissível para vigas de alumínio segundo a norma da AA.

SEÇÃO	ESCOAMENTO À COMPRESSÃO	ESCOAMENTO À TRAÇÃO	RUPTURA
I e U fletidos em relação ao eixo de maior inércia	$f_{cy} / 1,65 = 0,6 f_{cy}$	$f_{ty} / 1,65 = 0,6 f_{cy}$	$f_{tu} / 1,95 k_t = 0,6 f_{tu} / k_t$
I fletidos em relação ao eixo de menor inércia e barras maciças	$1,30 f_{cy} / 1,65 = 0,79 f_{cy}$	$1,30 f_{cy} / 1,65 = 0,79 f_{cy}$	$1,42 f_{tu} / 1,95 k_t = 0,73 f_{tu} / k_t$
tubos retangulares	$f_{cy} / 1,65 = 0,6 f_{cy}$	$f_{cy} / 1,65 = 0,6 f_{cy}$	$f_{tu} / 1,95 k_t = 0,6 f_{tu} / k_t$
tubos circulares	$1,17 f_{cy} / 1,65 = 0,71 f_{cy}$	$1,17 f_{cy} / 1,65 = 0,71 f_{cy}$	$1,24 f_{tu} / 1,95 k_t = 0,63 f_{cy}$

5.2. Instabilidade nas Barras Submetidas à Flexão

Sabe-se que a flambagem pode ocorrer nas barras submetidas a esforços de compressão. No caso de barras submetidas a flexão existem regiões submetidas a esforços de compressão e conseqüentemente sujeitas à flambagem.

Primeiramente tem-se a flambagem global da viga, denominada flambagem lateral com torção ou simplesmente flambagem lateral. Neste modo de ruína, a parte comprimida da viga perde estabilidade lateralmente e o resultado é a combinação de um deslocamento lateral com torção (figura 5.2).

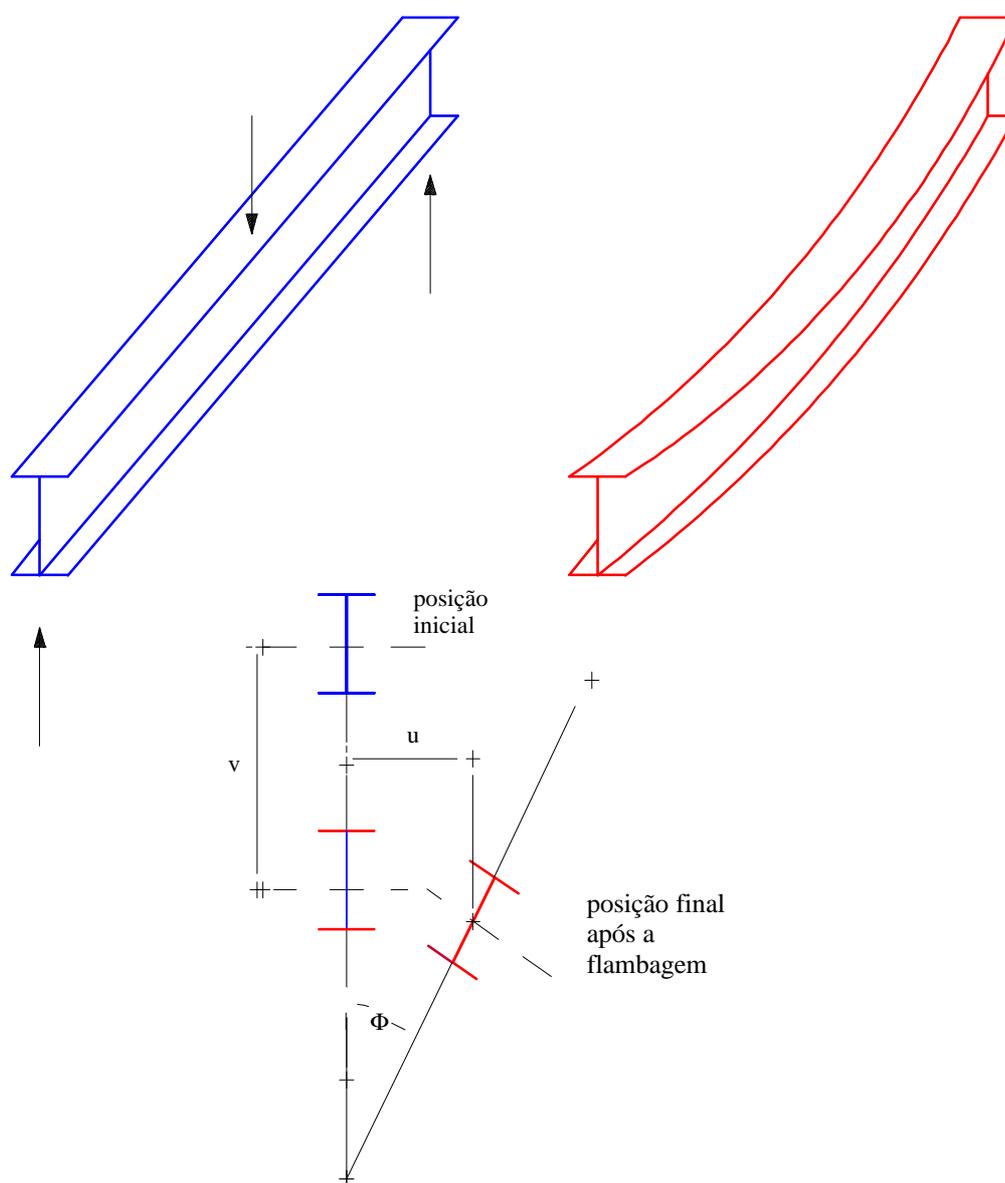


Figura 5.2: Flambagem lateral com torção em viga de seção I.

Nota-se que o deslocamento lateral da região comprimida impõe uma rotação da seção transversal uma vez que a região tracionada tende a permanecer na posição original.

Outro tipo de instabilidade associado às vigas é a flambagem local, que pode ocorrer em barras esbeltas comprimidas ou parcialmente comprimidas (mesa e alma). A verificação neste caso é similar à das barras comprimidas, determinando-se uma tensão admissível à flambagem local em função da esbeltez (relação largura - espessura)

5.2.1. Flambagem Lateral com Torção (FLT)

A flambagem lateral com torção pode ocorrer em vigas que apresentam flexão em torno do eixo de maior inércia, conforme ilustra, esquematicamente, a figura 5.3.

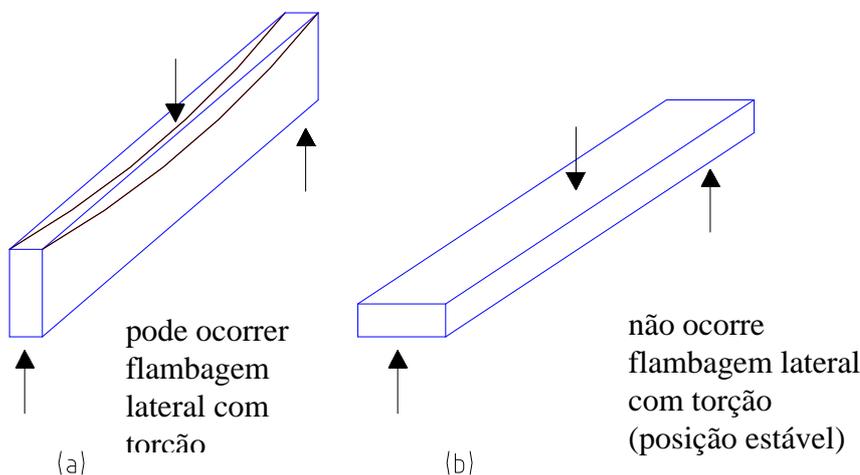


Figura 5.3: Flambagem lateral em vigas.

Os fundamentos teóricos da flambagem lateral com torção são apresentados em TIMOSHENKO & GERE (1961) e nas clássicas referências

de dimensionamento de elementos estruturais em aço, como por exemplo em SALMON & JOHNSON (1990). Analisando-se o caso fundamental que consiste na flexão pura (momento uniforme) de uma viga simplesmente apoiada, com seção transversal duplamente simétrica, e flexão em torno do eixo de maior inércia (figura 5.4), as três equações de equilíbrio do caso geral de instabilidade elástica resultam:

$$\begin{cases} EI_x v'''' + M = 0 & (5.1) \\ EI_y u'''' + M\phi' = 0 & (5.2) \\ EC_w \phi'''' - GI_t \phi'' + Mu' = 0 & (5.3) \end{cases}$$

Onde:

E - módulo de elasticidade longitudinal,

I_x - momento de inércia em relação ao eixo x,

I_y - momento de inércia em relação ao eixo y,

v - deslocamento do centro de torção na direção do eixo y,

u - deslocamento do centro de torção na direção do eixo x,

ϕ - ângulo de torção,

M - momento fletor na viga (constante),

C_w - constante de empenamento da seção,

I_t - momento de inércia à torção, ou constante de St. Venant,

determinada aproximadamente por:

$$\frac{1}{3} \sum b_i t_i^3 \quad \text{onde} \quad \begin{array}{ll} b - \text{largura} & \text{do elemento } i \\ t - \text{espessura} & \text{do elemento } i \end{array}$$

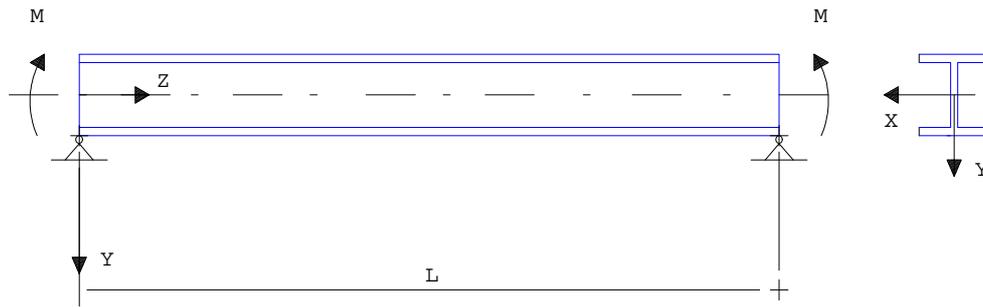


Figura 5.4: Viga simplesmente apoiada com momento fletor constante.

A primeira equação (5.1) na variável “v”, refere-se simplesmente aos deslocamentos verticais e sua solução conduz à equação da linha elástica:

$$v(z) = \frac{ML^2}{2EI_x} \left[\frac{z}{L} - \left(\frac{z}{L} \right)^2 \right] \quad (5.4)$$

As duas equações restantes (5.2 e 5.3) resultam acopladas nas variáveis “u” e “ ϕ ”, correspondendo ao deslocamento lateral e à rotação, respectivamente. A solução desse sistema de duas equações resulta na clássica expressão para o cálculo do momento fletor de flambagem elástica (5.5). Em termos de tensão de flambagem elástica, ou seja, dividindo-se o momento de flambagem elástica (M_c) pelo módulo de resistência elástico em relação à fibra mais comprimida (W_c), resulta a expressão 5.6.

$$M_c = \frac{\pi}{L} \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L} \right)^2 C_w I_y + EI_y G I_t} \quad (5.5)$$

$$\sigma_c = \frac{M_c}{W_c} = \frac{\pi}{W_c L} \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L} \right)^2 C_w I_y + EI_y G I_t} \quad (5.6)$$

A norma da AA apresenta uma expressão simplificada para o cálculo da tensão de flambagem elástica (5.7), desprezando-se os efeitos de torção e empenamento, de maneira análoga ao procedimento tradicionalmente empregado pelo AISC-ASD. Desta forma, a tensão de flambagem elástica na flexão é calculada por uma expressão idêntica à da flambagem elástica de barras comprimidas, tomando como esbeltez a relação $L_b / (1,2r_y)$.

O comprimento da viga empregado no cálculo da flambagem é denominado L_b e do mesmo modo que em perfis de aço, corresponde à distância entre dois pontos da viga travados lateralmente (vínculo de garfo: travamento lateral e impedimento à rotação).

$$\sigma_c = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{1,2r_y} \right)^2} \quad (5.7)$$

O momento (ou a tensão) de flambagem elástica pode ser majorada para levar em consideração a variação do momento fletor ao longo da viga, uma vez que a expressão 5.7 refere-se a caso mais desfavorável de momento uniforme. A majoração é feita pelo coeficiente de equivalência de momento na flexão (C_b). A expressão recomendada pela AA é a mesma do AISC-LRFD, 2ª edição (1993) - expressão 5.8, mais abrangente que a conhecida expressão das edições anteriores do AISC e da NBR 8800 (1986) - expressão 5.9.

$$C_b = \frac{12,5M_{\max.}}{2,5 M_{\max.} + 3M_A + 4 M_B + 3M_C} \quad (5.8)$$

Onde:

M_{\max} - valor absoluto do máximo momento no trecho analisado,

M_A - valor absoluto de momento no primeiro quarto do trecho analisado,

M_B - valor absoluto de momento no ponto médio do trecho analisado,

M_C - valor absoluto de momento no terceiro quarto do trecho analisado.

$$C_b = 1,75 + 1,05 \left(M_1/M_2 \right) + 0,3 \left(M_1/M_2 \right)^2 \leq 2,3 \quad (5.9)$$

Onde:

M_1 - menor momento ao longo da viga,

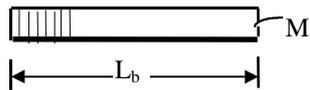
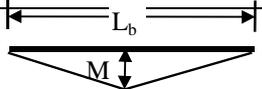
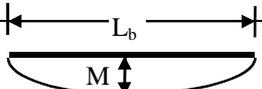
M_2 - maior momento ao longo da viga.

A relação M_1 / M_2 é positiva para curvatura reversa e negativa para curvatura simples.

A expressão 5.8 é aplicável a qualquer caso de distribuição de momento fletor ao longo do trecho analisado, enquanto a antiga expressão 5.9, amplamente conhecida pelo projetistas de estruturas metálicas, não é aplicável aos casos onde a distribuição de momento fletor não é linear e também nos casos onde o máximo momento no trecho analisado não ocorre na extremidade.

A tabela 5.3 apresenta os valores de C_b calculados pelas duas expressões, tomando-se alguns casos mais freqüentes.

Tabela 5.3: Valores de C_b para alguns casos freqüentes.

	CASO	Expressão 5.8	Expressão 5.9	C_b (5.8)/ C_b (5.9)
1		1,0	1,0	1,0
2		1,67	1,75	0,954
3		2,27	2,3	0,987
4		1,25	1,3	0,962
5		1,32	não aplicável ($C_b=1,0$)	1,32
6		1,14	não aplicável ($C_b=1,0$)	1,14

A expressão 5.7 é conservadora, uma vez que despreza os efeitos de torção e empenamento. A norma da AA permite que o raio de giração em relação ao eixo de menor inércia r_y , seja substituído por r_{ye} , calculado pela expressão 5.10, onde são considerados os efeitos de torção e empenamento para o caso de carregamento aplicado no centro de torção.

O parâmetro K_y , leva em consideração as condições de vinculação relativas a flexão lateral (em torno do eixo y). Para o caso de não haver restrição ao giro nos pontos de travamento lateral, o que em geral ocorre na prática, K_y deve ser adotado igual a 1,0.

$$r_{ye} = \frac{\sqrt{C_b}}{1,7} \sqrt{\frac{I_{yd}}{W_c}} \sqrt{1 + 0,152 \frac{I_t}{I_y} \left(\frac{K_y L_b}{d} \right)^2} \quad (5.10)$$

A norma da AA apresenta outra expressão que leva em consideração o ponto de aplicação do carregamento em relação ao centro de torção (5.11). Para o caso de carregamento aplicado na mesa superior (desfavorável) o termo 0,5 deve ser tomado como negativo, e quando aplicado na mesa inferior (favorável), como positivo.

$$r_{ye} = \frac{\sqrt{C_b}}{1,7} \sqrt{\frac{I_{yd}}{W_c}} \left[\pm 0,5 + \sqrt{1,25 + 0,152 \left(\frac{I_t}{I_y} \right) \left(\frac{K_y L_b}{d} \right)^2} \right] \quad (5.11)$$

Onde:

r_{ye} - raio efetivo de giração utilizado no lugar de r_y ,

C_b - coeficiente de equivalência de momentos na flexão,

I_y - momento de inércia em relação ao eixo de menor inércia da viga,

C_w - constante de empenamento da seção,

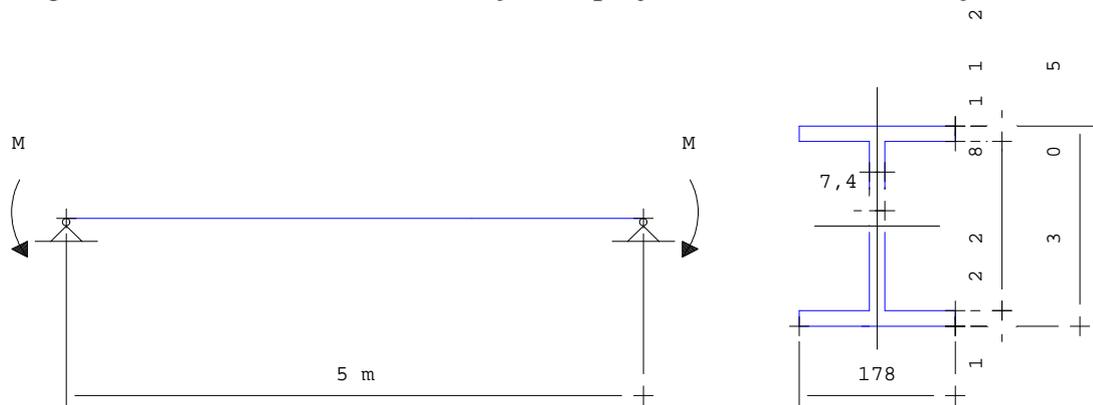
I_t - momento de inércia à torção, ou constante de St. Venant,

K_y - coeficiente do comprimento efetivo para a mesa comprimida em relação ao menor eixo de inércia,

d - comprimento da viga.

É importante notar que o fator C_b já está incluído na expressão de r_{ye} , portanto não deve ser aplicado na expressão 5.7, quando r_y for substituído por r_{ye} .

A tabela 5.4 apresenta uma comparação entre os valores do raio de giração e da tensão de flambagem elástica para a viga esquematizada na figura 5.5, onde pode-se notar que para o caso de carregamento no centro de torção, o raio de giração é majorado em 16% e a tensão de flambagem elástica em 35% ao considerar os efeitos de torção e empenamento. Outro aspecto interessante de se analisar é a relação entre a tensão de flambagem elástica para o carregamento na mesa inferior e na mesa superior, que resultou igual a 2,0, o que demonstra a grande influência desta condição na capacidade da viga, o que em geral não é levado em consideração no projeto das estruturas de aço.



I 305 x 17,1 kg/m

$$A = 64 \text{ cm}^2$$

$$I_x = 10.655 \text{ cm}^4$$

$$W_c = W_x = 698 \text{ cm}^3$$

$$I_y = 1.120 \text{ cm}^4$$

$$r_y = 4,19 \text{ cm}$$

$$I_t = 25,85 \text{ cm}^4$$

Figura 5.5: Viga referente aos resultados da tabela 5.4.

Tabela 5.4: Raio de giração e tensão de flambagem elástica (FLT) para a viga da figura 5.5.

Expressão para o cálculo de r_{ye} (ou r_y)	r_y (cm)	r_{ye} (cm)	σ_c (kN/cm ²)
5.7	4.19	-	6,98
5.10	-	4,86	9,40
5.11 (com + 0,5) carregamento na mesa inferior	-	5,79	13,34
5.11 (com - 0,5) carregamento na mesa superior	-	4,07	6,59
Em todos os casos adotou-se $C_b = 1,0$ para efeito de comparação			

A norma da AA estabelece que as expressões 5.10 e 5.11 também podem ser aplicadas a perfis monossimétricos sujeitos à flexão em torno do eixo de simetria, como por exemplo os perfis U fletidos em torno do eixo perpendicular à alma.

A flambagem inelástica, ou seja, sob tensão superior ao limite de proporcionalidade do material é admitida de maneira similar ao caso de barras comprimidas, adotando-se uma relação linear entre a esbeltez e a tensão de flambagem. Desta forma, a curva de flambagem na flexão também é constituída por três trechos e a tensão admissível é calculada com um fator de segurança único, igual a 1,65, para todos os trechos. O AISC-ASD também adota um fator de segurança único, igual a 1,67. A figura 5.6 ilustra a curva de flambagem, em termos de tensões admissíveis, para a liga 6061-T6.

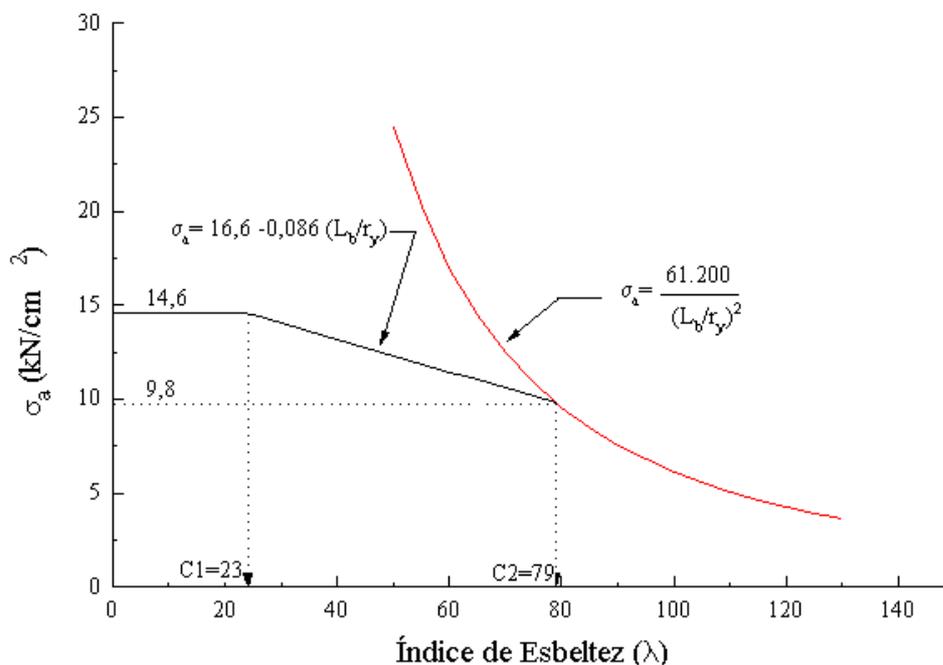


Figura 5.6: Curva de flambagem na flexão (FLT), em termos de tensões admissíveis, para a liga 6061-T6. Aplicável a perfis I e U fletidos em relação ao eixo de maior inércia.

5.2.2. Flambagem Local em Elementos de Viga

Os conceitos e procedimentos já abordados para o caso de elementos pertencentes a barras comprimidas também são aplicáveis aos elementos de viga, ocorrendo agora dois “grupos de elementos”: os submetidos à compressão uniforme, como por exemplo a mesa de perfis I e U fletidos em torno do eixo de maior inércia; e os não submetidos à compressão uniforme, como por exemplo a alma de perfis I e U fletidos em torno do eixo de maior inércia e as mesas de perfis I e U fletidos em torno do eixo de menor inércia.

A norma da AA apresenta as expressões para o cálculo da tensão admissível à flambagem local, de maneira similar ao caso dos elementos

pertencentes à barras comprimidas, adotando fator de segurança constante e igual a 1,65, mantendo coerência com a flambagem global.

A figura 5.7 apresenta as curvas de flambagem local da AA, em termos de tensão admissível, para elementos com borda livre e compressão uniforme (mesa de perfis I e U), e elementos com bordas apoiadas sob flexão simétrica (alma de perfis I e U simétricos em relação ao eixo de maior inércia), para a liga 6061-T6. Notar que nessa figura foi incluída a curva para elementos com borda livre e compressão uniforme, pertencentes a barras axialmente comprimidas.

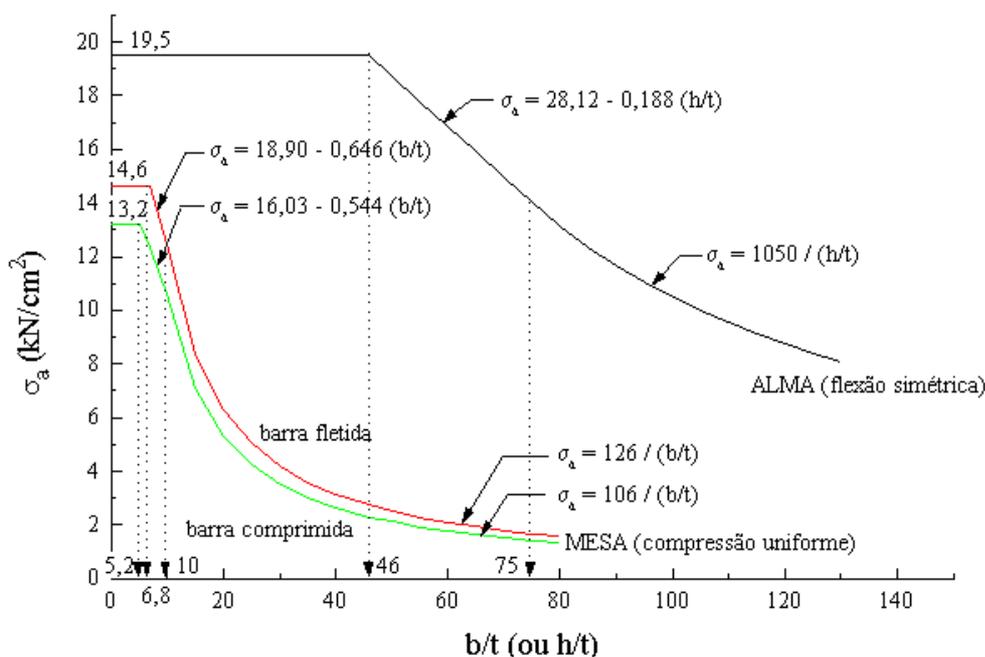


Figura 5.7: Curvas de flambagem local para a liga 6061-T6.

Assim como nas barras comprimidas, a tensão admissível à flambagem local das barras submetidas à flexão pode ser tomada, a favor da segurança, igual ao menor valor obtido com base na análise de todos os elementos que compõem a seção (mesa, alma ou enrijecedor).

A norma da AA permite que seja adotado um valor correspondente à média ponderada das tensões de flambagem local. Por esse método, a tensão admissível de cada elemento é ponderada pela sua área, conforme já abordado para as barras comprimidas. Entretanto, no caso de barras fletidas, a área da mesa para o cálculo da tensão admissível média, deve ser tomada como a área da região situada à uma distância maior que dois terços da distância da linha neutra a fibra extrema comprimida da seção, conforme ilustra a figura 5.8.

Outra consideração que merece comentário refere-se aos elementos com borda livre, sob distribuição linear de tensão, como por exemplo as mesas de perfis U fletidos em relação ao eixo de menor inércia. Nesse caso, se a tensão na borda livre for de tração, o elemento pode ser analisado como apoiado em ambas as bordas.

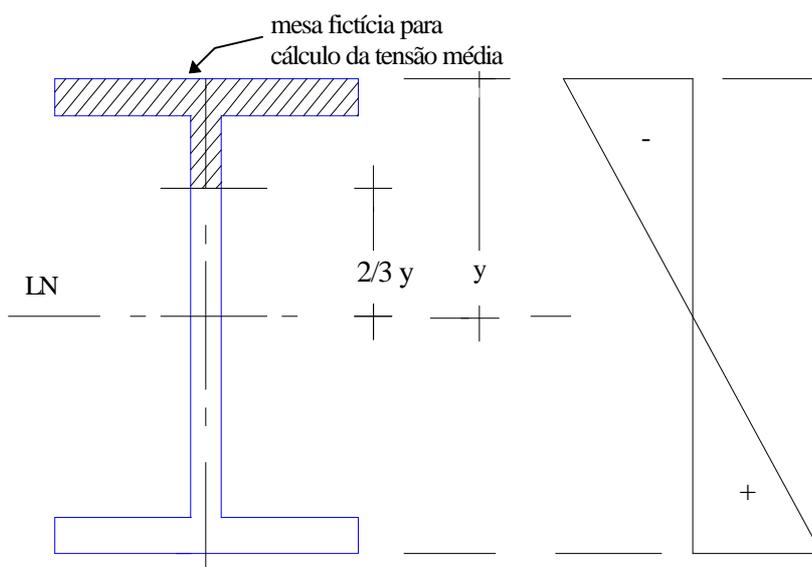


Figura 5.8: Mesa fictícia para o cálculo da tensão admissível à flambagem local de vigas, pelo método das médias ponderadas.

5.2.3. Interação entre flambagem global (FLT) e flambagem local

Assim como no caso das barras comprimidas, a interação entre os dois modos de flambagem deve também ser verificada, uma vez que nas vigas constituídas por seções com elementos esbeltos (relação b/t maior que C_2), a flambagem local pode precipitar a ocorrência da flambagem global (flambagem lateral com torção).

Portanto, além da verificação isolada dos dois modos de flambagem, deve-se calcular uma tensão admissível reduzida (σ_{ar}), conforme apresentado na expressão 4.35, considerando-se agora o fator de segurança empregado na flexão, igual a 1,65.

5.3. Enrugamento da alma

O enrugamento da alma é um fenômeno localizado que pode ocorrer em almas não enrijecidas, sujeitas à força concentrada (figura 5.9). Esse fenômeno não deve ser confundido com a flambagem local, a qual refere-se à flambagem de uma chapa (mesa ou alma) sob determinadas condições de vinculação e distribuição de tensão.

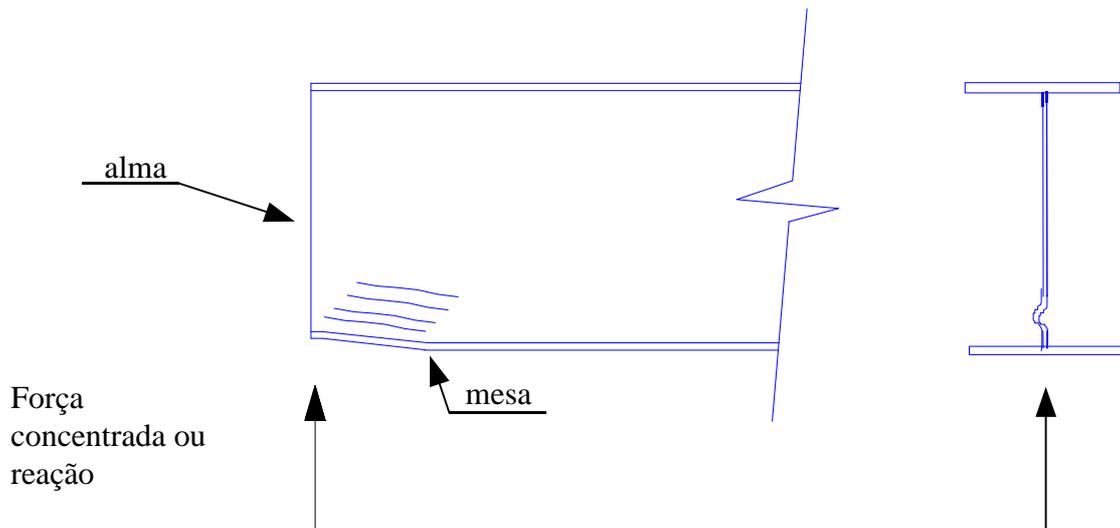


Figura 5.9: Enrugamento da alma de uma viga I.

Assim como nas normas de dimensionamento de estruturas de aço, a norma da AA apresenta uma expressão empírica para a avaliação da força concentrada admissível da alma (F_a). Essa expressão é geral, e se aplica tanto aos perfis extrudados como aos perfis formados a frio.

Para os casos usuais de perfis I ou U, com a alma paralela ao plano que contém a força concentrada e o raio interno de concordância entre mesa e alma admitido como nulo, a expressão resulta em 5.12.

$$F_a = 0,412\beta t_w^2 (0,667f_{cy} + 2,426\sqrt{f_{cy}})(N + C) \quad (5.12)$$

Onde:

F_a - força concentrada (ou reação de apoio) admissível, em kN;

$\beta = 1,0$ para forças fora da extremidade da viga;

$\beta = 1,2$ para forças na extremidade da viga;

t_w - espessura da alma, em cm;

f_{cy} - resistência ao escoamento na compressão, em kN/cm²;

N - extensão de região de aplicação da força ou da reação de apoio, em cm;

C = 13,7 cm para forças fora da extremidade da viga;

C = 3,3 cm para forças na extremidade da viga;

5.4. Enrugamento da alma e flexão combinados

Nos casos em que a alma é afetada pelos efeitos de força concentrada em regiões onde a tensão oriundas da flexão também são elevadas, a alma fica sujeita a um estado de tensão ilustrado esquematicamente na figura 5.10, o que pode conduzir a uma situação muito mais desfavorável que as previstas pelas situações isoladas dos efeitos da flexão e do enrugamento.

A última edição da norma da AA (6ª edição) apresenta uma expressão de interação para tal verificação (5.13), o que não era previsto nas edições anteriores.

$$\left(\frac{M}{M_a} \right)^{1,5} + \left(\frac{F}{F_a} \right)^{1,5} \leq 1,0 \quad (5.13)$$

Onde:

M - momento fletor na seção onde atua a força concentrada,

M_a - momento fletor admissível, calculado para a flexão isoladamente,

F - força concentrada na seção analisada,

F_a - força concentrada admissível conforme expressão 5.12.

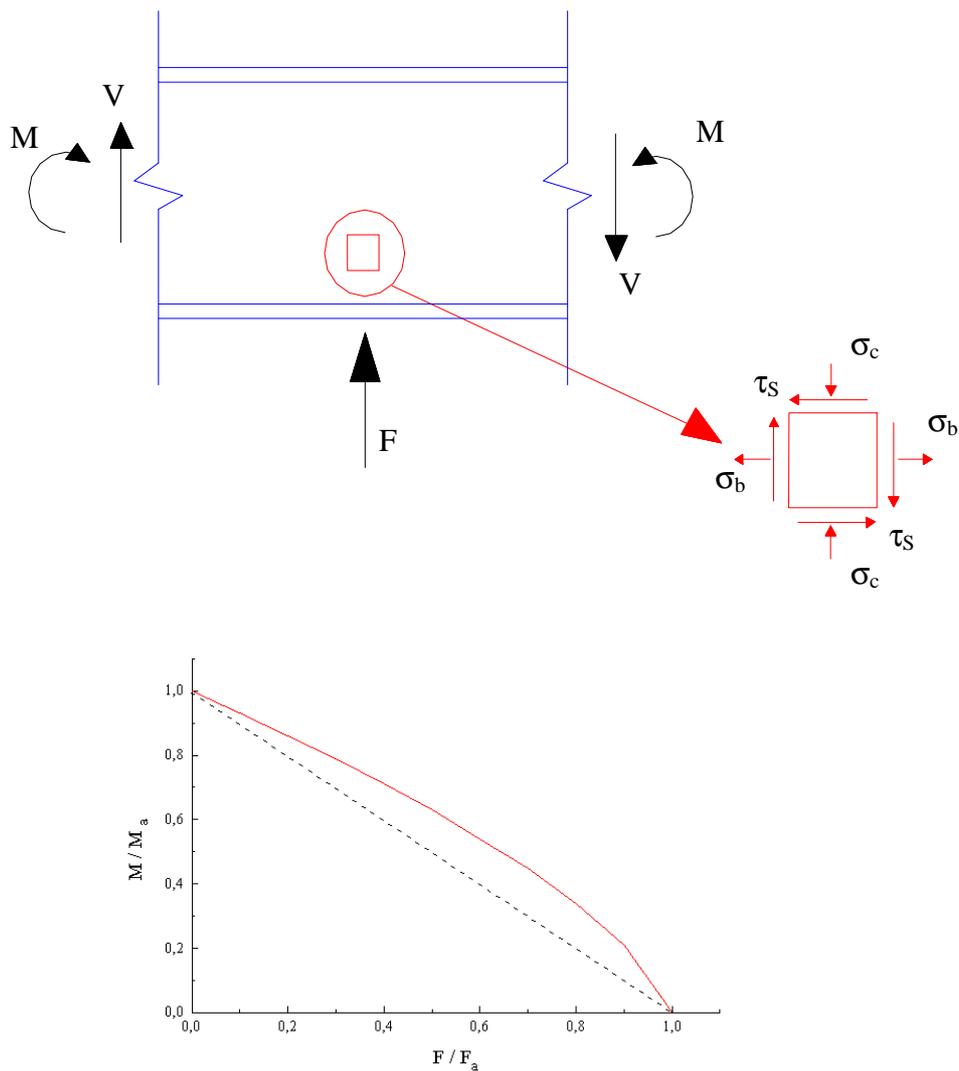


Figura 5.10: Estado combinado de tensões para o enrugamento e flexão na alma de uma viga.

5.5. Cisalhamento por flexão

A verificação da força cortante em vigas de alumínio é similar à das vigas de aço, constituindo uma análise da alma sujeita ao escoamento ou à flambagem local. A norma da AA aborda dois casos: alma sem enrijecedores e almas com enrijecedores.

A tensão de cisalhamento na alma dos perfis usuais (I, U ou caixão) pode ser avaliada com razoável aproximação, pela tensão média na alma (expressão 5.14), procedimento usual no projeto de estruturas de aço.

$$\tau = \frac{V}{A_w} \quad (5.14)$$

Onde:

V - força cortante na seção

A_w - área da alma

A curva de flambagem para almas sem enrijecedores é constituída por três trechos: escoamento por cisalhamento, flambagem inelástica e flambagem elástica, conforme as expressões 5.15, 5.16 e 5.17, respectivamente. Nesse caso o fator de segurança é adotado como 1,65 para os três trechos.

- escoamento por cisalhamento:

$$\tau_a = \frac{0,6f_{ty}}{1,65} \quad (5.15)$$

- flambagem inelástica:

$$\tau_a = \frac{B_p - 1,25D_p (h/t)}{1,65} \quad (5.16)$$

- flambagem elástica:

$$\tau_a = \frac{\pi^2 E}{1,65(1,25h/t)^2} \quad (5.17)$$

O efeito pós-flambagem, denominado “efeito do campo de tração”, que é mobilizado no caso de almas esbeltas com enrijecedores transversais, não é admitido diretamente pela norma da AA, mas sim indiretamente aplicando-se

um fator de segurança igual a 1,2 para tensão admissível na flambagem elástica.

Assim no caso de almas com enrijecedores, a curva de flambagem é constituída por apenas dois trechos: escoamento por cisalhamento e flambagem elástica. A figura 5.11 ilustra a curva de flambagem para a liga 6061-T6, nos casos de almas sem e com enrijecedores.

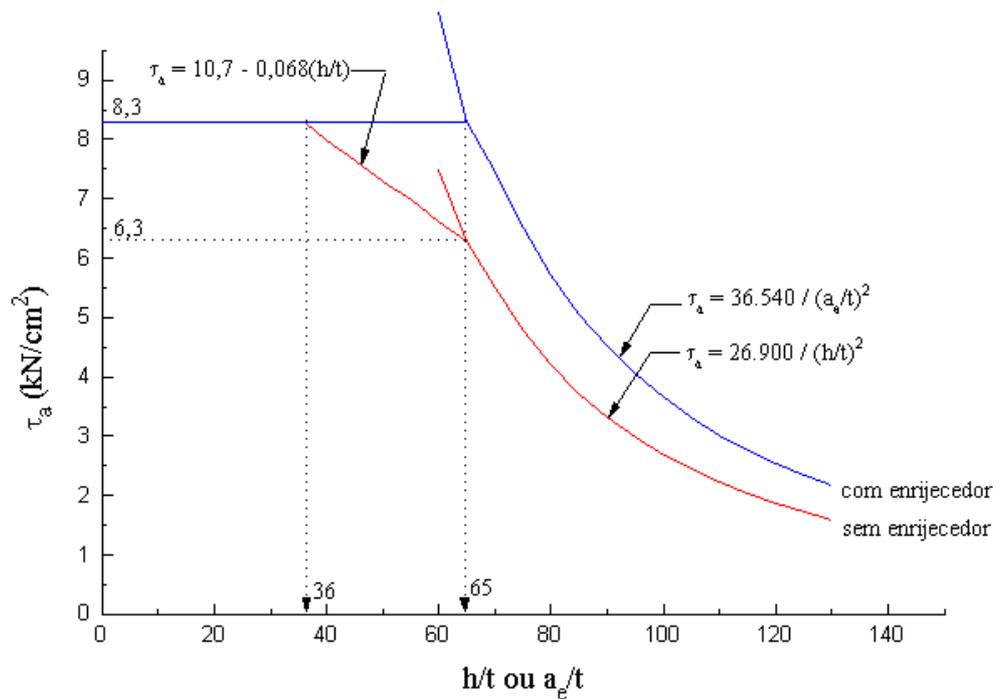


Figura 5.11: Curvas de flambagem para cisalhamento - liga 6061-T6.

A esbeltez das almas sem enrijecedores é dada pela relação entre a altura da alma (distância livre entre mesas) e a espessura, h/t . Para as almas com enrijecedores, a esbeltez é dada pela relação a_e/t , sendo a_e calculado pela expressão 5.18 (ver figura 5.12)

$$a_e = \frac{a_1}{\sqrt{1 + 0,7(a_1/a_2)^2}} \tag{5.18}$$

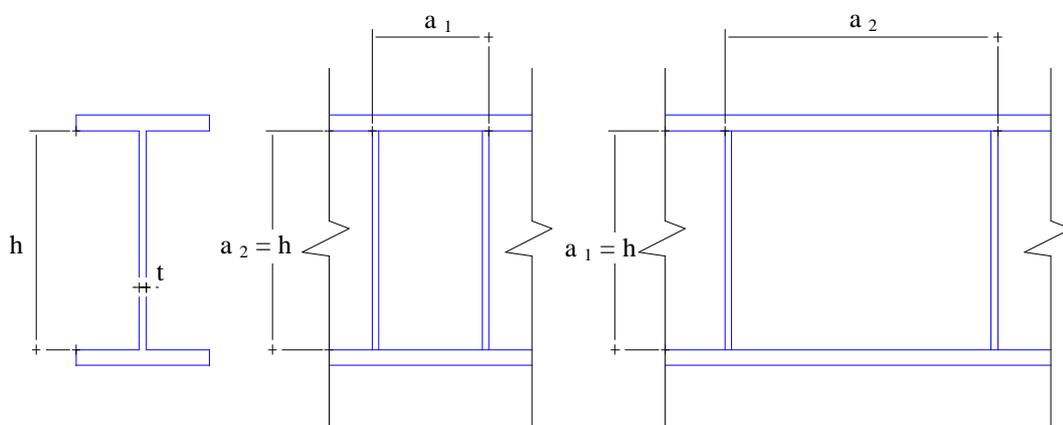


Figura 5.12: Dimensões a_1 e a_2 para cálculo da dimensão efetiva a_e .

É interessante observar que, embora os resultados sejam os mesmos o procedimento da AA é diferente do usualmente apresentado pelas normas de estruturas de aço, onde a influência dos enrijecedores transversais (relação a/h) é considerada diretamente no cálculo do coeficiente flambagem de chapa por cisalhamento (k), e não como uma dimensão efetiva (a_e).

A tensão de flambagem local elástica calculada pela norma da AA é em torno de 27% maior que a calculada pelo procedimento do AISC (ou do AISI), uma vez que a AA adota como condição de vinculação da chapa de alma a restrição parcial ao giro (engastamento parcial), correspondendo ao coeficiente de flambagem local $k = 6,84$ (implica em $\alpha = 1,25$, no denominador da expressão 5.17), valor compreendido entre 5,34 (bordas apoiadas) e 8,98 (bordas engastadas).

No cálculo da tensão de cisalhamento admissível o AISC utiliza as expressões seguintes, que conduzem a resultados próximos aos da norma do AA.

$$\tau = k_v \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)(h/t)^2} \quad (5.19)$$

$$k_v = 4,0 + \frac{5,34}{(a/h)^2} \text{ para } a/h \leq 1,0 \quad (5.20)$$

$$k_v = 5,34 + \frac{4,0}{(a/h)^2} \text{ para } a/h > 1,0 \quad (5.21)$$

6. Barras Submetidas à Flexão Composta

O procedimento de verificação das barras de alumínio submetidas à flexão composta é similar ao aplicado no projeto de estruturas de aço, consistindo de expressões de interação envolvendo os efeitos da força normal e do momento fletor.

A força normal atuando numa barra submetida à flexão, causa um momento fletor adicional, denominado momento fletor de segunda ordem, cujo valor numa determinada seção é dado pelo produto $(N) \times (y)$, sendo y o deslocamento da barra na seção correspondente. Esse momento fletor adicional tem o mesmo sentido do momento fletor de primeira ordem (proveniente da seção apenas) no caso de flexo-compressão, consistindo num efeito amplificador (figura 6.1-a). No caso da flexo-tração, o momento de segunda ordem tem sentido contrário ao de primeira ordem, caracterizando-se num efeito redutor (figura 6.1-b).

A norma da AA, assim como as normas de estruturas de aço, consideram o efeito de segunda ordem (amplificador) na flexo-compressão e, a favor da segurança desprezam-no na flexo-tração.

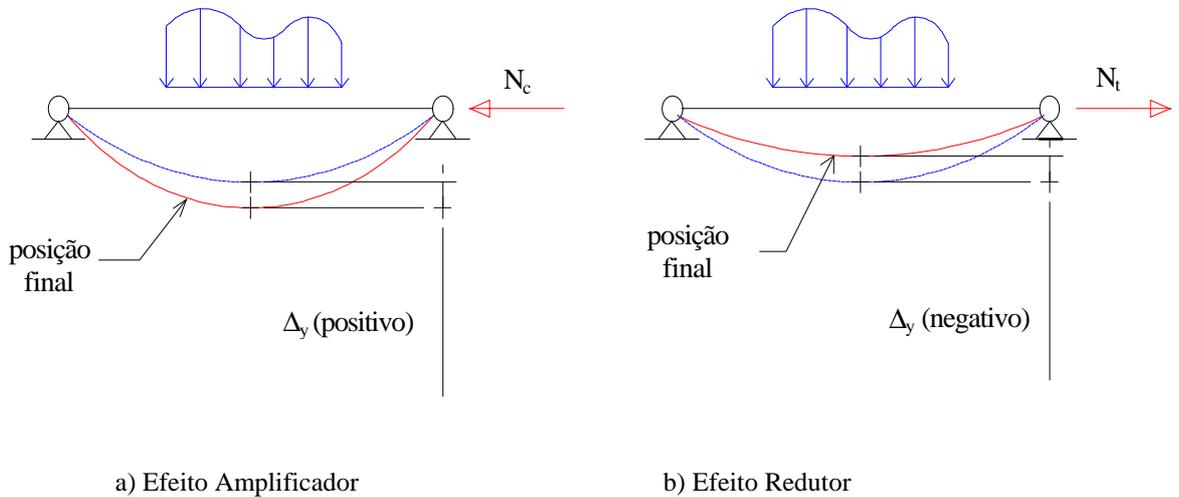


Figura 6.1: Efeito de segunda ordem na flexão composta.

6.1. Flexo-Compressão

Na flexo-compressão, duas expressões de interação devem ser atendidas. A expressão 6.1 envolve os fenômenos de flambagem local e global, bem como o efeito de segunda ordem que amplifica o momento fletor. É usualmente designada como “uma condição de estabilidade” da barra.

A expressão 6.2 refere-se a uma simples superposição de tensões, sem o efeito de segunda ordem e sem a consideração da flambagem global na compressão. É usualmente designada como uma “condição de resistência” da barra.

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{aN}} + \frac{C_{Mx} \sigma_{Mx}}{\sigma_{ax} (1 - \sigma_N / \sigma_{ex})} + \frac{C_{My} \sigma_{My}}{\sigma_{ay} (1 - \sigma_N / \sigma_{ey})} \leq 1,0 \quad (6.1)$$

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{ao}} + \frac{\sigma_{Mx}}{\sigma_{ax}} + \frac{\sigma_{My}}{\sigma_{ay}} \leq 1,0 \quad (6.2)$$

Onde:

σ_N - tensão de compressão proveniente da força normal,

σ_{Mx} ; σ_{My} - tensão de compressão máxima (na fibra externa da seção),
devida à flexão em relação aos eixos principais x e y,
respectivamente,

σ_{aN} - tensão admissível à compressão centrada, conforme capítulo 4,

σ_{a0} - tensão admissível à compressão centrada, conforme capítulo 4,
admitindo $\lambda = 0$, ou seja, desconsiderando a flambagem global,

σ_{ax} ; σ_{ay} - tensão admissível à flexão em relação aos eixos principais x e
y, respectivamente, conforme capítulo 5,

σ_{ex} ; σ_{ey} - tensão admissível à flambagem elástica (Euler) em relação aos
eixos principais x e y, respectivamente, dada por:

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_x^2} ; \sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_y^2}$$

C_{mx} ; C_{my} - coeficiente de equivalência de momento na flexão em
relação aos eixos principais x e y, respectivamente, dado por:

$C_m = 0,6 - 0,4 (M_1 / M_2)$ para barras pertencentes às estruturas
indeslocáveis, ou $C_m = 0,85$ para barras pertencentes às estruturas
deslocáveis no plano de flexão.

M_1 / M_2 é a relação entre o menor e o maior momento de
extremidade da barra no plano de flexão analisado. O sinal é
positivo para curvatura reversa e negativo para curvatura simples.

É interessante observar que as normas de estruturas de aço
apresentam três situações para a determinação de C_m , dividindo as
barras pertencentes às estruturas indeslocáveis em dois casos:
quando não há carregamento transversal, aplica-se a expressão

anterior; caso contrário, $C_m = 0,85$ quando ambas as extremidades forem engastadas e $C_m = 1,0$ nos demais casos.

Se a influência da força normal for relativamente pequena, ou seja, se a relação $\sigma_N / \sigma_{aN} \leq 0,15$, a norma da AA permite substituir as duas expressões anteriores pela expressão 6.3, desprezando o efeito de segunda ordem, resultando:

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{aN}} + \frac{\sigma_{Mx}}{\sigma_{ax}} + \frac{\sigma_{My}}{\sigma_{ay}} \leq 1,0 \quad (6.3)$$

6.2. Flexo-Tração

Na flexo-tração, basta verificar uma única expressão de interação (6.4), referente à superposição dos efeitos da força normal e do momento fletor, uma vez que o efeito de segunda ordem é desprezado.

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{aN}} + \frac{\sigma_{Mx}}{\sigma_{ax}} + \frac{\sigma_{My}}{\sigma_{ay}} \leq 1,0 \quad (6.4)$$

Onde:

σ_N - tensão de tração proveniente da força normal,

σ_{Mx} ; σ_{My} - tensão de tração máxima (na fibra externa da seção), devida à flexão em relação aos eixos principais x e y, respectivamente,

σ_{aN} - tensão admissível à tração, conforme capítulo 3,

σ_{ax} ; σ_{ay} - tensão admissível à flexão em relação aos eixos principais x e y, respectivamente, conforme capítulo 5.

6.3. Interação entre força normal de compressão, momento fletor e força cortante

A norma da AA estabelece critérios para a verificação dos efeitos combinados da força normal de compressão, momento fletor e força cortante, o que é usualmente previsto nas normas de aço. Tal situação em geral não é crítica no dimensionamento, porém pode ser condicionante no caso de barras sob flexo-compressão com força cortante elevada. As expressões de interação para tal caso estão descritas a seguir:

- para almas de perfis I, U ou caixão:

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{aN}} + \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_{aM}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 \leq 1,0 \quad (6.5)$$

- para elementos curvos (tubos circulares por exemplo):

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{aN}} + \frac{\sigma_M}{\sigma_{aM}} + \left(\frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 \leq 1,0 \quad (6.6)$$

Onde:

σ_N - tensão de compressão proveniente da força normal,

σ_M - tensão de compressão máxima (na fibra externa da seção), devida à flexão,

σ_{aN} - tensão admissível à compressão, conforme capítulo 4,

σ_{aM} - tensão admissível à flexão, conforme capítulo 5.

τ - tensão de cisalhamento,

τ_a - tensão admissível de cisalhamento, conforme capítulo 5.

7. Ligações

As ligações entre elementos estruturais em alumínio são similares às ligações entre elementos de aço, entretanto requerem alguns cuidados em função das propriedades deste material, principalmente com relação à marcação e preparação das superfícies a serem ligadas e com a adequação do material a ser utilizado.

Segundo ABDO (1983) a ligação de elementos de alumínio com elementos de outros metais, principalmente aço, requerem cuidados com a presença de umidade, que pode ocasionar corrosão galvânica das peças. Neste caso as providências especiais a serem tomadas podem ser a pré pintura, a injeção de juntas isolantes ou a galvanização a fogo das peças de aço.

Sabendo-se que o coeficiente de dilatação térmica do alumínio é duas vezes maior que o do aço, em situações que ocorram variações bruscas da temperatura, deve-se prever a possibilidade de pequenas variações dimensionais das peças, que no caso de ligações parafusadas pode levar a diferenças dimensionais na marcação dos furos.

Os furos das peças para a colocação de rebites ou parafusos devem ser executados com furadeiras ou estampados e abertos com broca alargadora, não devendo ser simplesmente estampados, a fim de se evitar trincas na borda com eventual ruína por fadiga.

Como nos elementos de aço, as ligações entre elementos de alumínio pode ser feita, de maneira geral, por rebites, parafusos ou solda, e deve obedecer, além das características próprias do projeto, as propriedades das ligas utilizadas e as facilidades de cada processo.

Pode-se agrupar as ligações, de modo geral, em dois grandes grupos, os das ligações com conectores e o das ligações soldadas.

7.1. Ligações com Conectores

As ligações com conectores são muito utilizadas nas estruturas metálicas, sobressaindo-se nas estruturas de alumínio. Os elementos mais empregados nestes tipos de ligações são os parafusos com porcas e arruelas, os rebites, os pinos e os parafusos de rosca soberba (auto-atarraxantes).

Nas estruturas em alumínio, as ligações com conectores destacam-se em relação as ligações soldadas, principalmente pelo fato da solda provocar aumento localizado de temperatura nesta região que ocasiona diminuição da resistência local do elemento de alumínio conectado. Em certas ligas, como na 6061-T6, esta redução pode chegar a 40% para a região da solda em comparação com o restante da peça, segundo KISSEL & FERRY (1995).

Se comparado com as estruturas de aço, os processos de inspeção e os reparos de soldas em estruturas de alumínio são mais caros. Desta maneira, as ligações com conectores para as estruturas em alumínio em geral são mais viáveis tanto no aspecto estrutural quanto econômico.

7.1.1. Ligações Rebitadas

O processo de rebitagem foi muito utilizado nas estruturas de aço até a Segunda Guerra Mundial, caindo em desuso por questões econômicas.

Para as estruturas em alumínio o processo de rebitagem ganha características próprias, sendo que o processo empregado neste caso recebe a denominação de rebitagem a frio, ou seja, sem o aquecimento do rebite.

Os rebites de alumínio são geralmente feitos em ligas mais moles como as 6053-T61, 6061-T6 e 7075-T73, com diâmetros variando de 16 mm a 25 mm.

Antes da rebiteagem, o rebite é um pino com apenas uma cabeça que é introduzido no furo, previamente feito nos elementos a serem ligados. O seu comprimento deve ser suficientemente longo para atravessar as espessuras das chapas a serem ligadas e proporcionar a formação de uma segunda cabeça na outra extremidade do rebite.

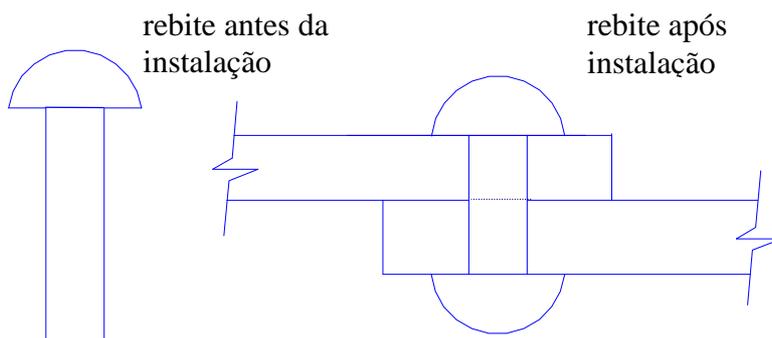


Figura 7.1: Rebite tradicional.

O processo de rebiteagem a frio consiste em introduzir o rebite no furo por uma das faces da conexão das chapas e com o auxílio de um martelo pneumático ou de um martelo comum pressioná-lo contra um anteparo posicionado na outra face da ligação, propiciando a formação da segunda cabeça do rebite.

Este sistema de rebiteagem prevê o acesso aos dois lados da ligação devido ao uso das ferramentas para a sua fixação. O diâmetro dos furos deve ser ligeiramente maior que o diâmetro dos rebites, sendo estes totalmente preenchido pelo material do rebite após a rebiteagem.

O ALUMINUM DESIGN MANUAL (1994), parte VIII, apresenta especificações para os rebites, suas dimensões e as pressões necessárias para fixação.

Com relação ao processo de rebiteagem, ABDO (1983) apresenta alguns cuidados recomendados para uma boa rebiteagem, destacando-se os mencionados a seguir:

- Não submeter os rebites a esforços de tração, embora a resistência à tração das ligas de alumínio ser cerca de 40% maior que a resistência ao cisalhamento, em função de não ser possível controlar a resistência à tração nas ligações rebitadas como ocorre nas ligações parafusadas com controle de torque.
- Não utilizar diâmetros de rebites três vezes maior que a menor espessura das partes a serem rebitadas.
- Dar preferência para a formação de cabeças cônicas ou chatas nos rebites, sendo que as cabeças ovaladas requerem o dobro de esforço na rebitagem.

O espaçamento mínimo entre rebites para elementos de alumínio é análogo ao dos elementos de aço devendo ser igual a três vezes o diâmetro dos rebites. Também a distância mínima do rebite até a borda da chapa deve ser duas vezes o seu diâmetro (figura 7.2).

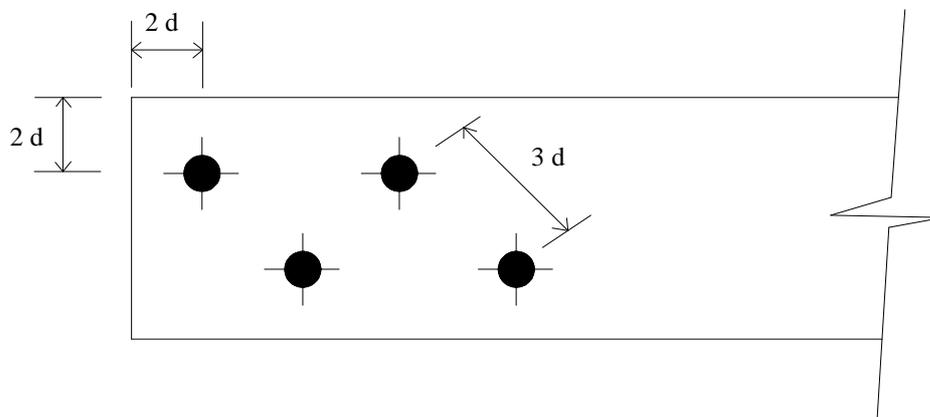


Figura 7.2: Espaçamento mínimo entre rebites e entre rebites e borda.

O espaçamento máximo entre rebites deve ser limitado, no caso de peças comprimidas, devido à possibilidade de flambagem local das chapas conectadas.

A fim de se obter maior resistência à corrosão nas juntas rebitadas recomenda-se que as peças sejam pré pintadas com uma demão de primer

bicromato de zinco ou similar, sendo aguardada a secagem das peças antes da rebitagem.

Outro tipo de rebite é aquele conhecido como rebite “pop”, que pode ser instalado com acesso por um único lado da ligação. Este tipo de rebite apresenta um pino móvel que passa pelo interior de um cilindro com uma extremidade saliente à cabeça do mesmo. Com o auxílio de uma ferramenta puxa-se o pino para fora do cilindro forçando a deformação da manga do pino contra a outra extremidade do tronco, formando a segunda cabeça do rebite. A parte sobressalente do pino é cortada quando o rebite estiver devidamente fixado.

Para inspecionar o final da ligação bate-se no rebite buscando um som característico indicando que todo o furo está preenchido, e conseqüentemente que o rebite não está frouxo.

Um dos parâmetros mais importantes para selecionar um rebite deste tipo é a espessura total das chapas conectadas, que determina o comprimento do rebite para a formação da segunda cabeça.

Com relação ao diâmetro dos rebites de modo geral, a norma da AA, reconhece rebites de 4,76 mm (3/16 ") a 19,0 mm (3/4 ") em alumínio, mas rebites em aço inoxidável também podem ser utilizados em ligações de elementos de alumínio.

7.1.2. Ligações Parafusadas

As ligações parafusadas em estruturas de alumínio podem utilizar parafusos de aço ou alumínio. Estes geralmente apresentam cabeça sextavada ou quadrada com porcas sextavadas ou quadradas, também em aço ou alumínio.

As dimensões dos parafusos, roscas e porcas são especificadas de maneira análoga aos parafusos de aço. A utilização de arruelas é opcional nos furos padrão, mas deve ser sempre utilizada nos furos alargados.

As ligas comumente empregadas nos parafusos de alumínio são as 2024-T4, 6061-T6 e 7075-T73. A liga 6262-T9 é utilizada unicamente para a confecção de porcas.

Entretanto as ligações parafusadas em estruturas de alumínio não precisam utilizar unicamente parafusos de alumínio, pode-se utilizar parafusos de aço inoxidável ou de aço carbono galvanizado. A norma da AA aborda os parafusos de aço devido a grande utilização dos mesmos.

Outro tipo comum de parafuso utilizado em estruturas metálicas são os parafusos encamisados conhecidos como *lockbolts*, sendo que este próprio parafuso apresenta uma espécie de porca que se rompe com o aperto do parafuso, permitindo sua fixação.

Os *lockbolts* têm características de um parafuso propriamente dito, e de um rebite devido à sua auto-fixação.

Ele é constituído por um pino com rosca e um colar em sua extremidade com a mesma função da porca, ou seja, travar a ligação. Sua instalação consiste na aplicação de um aperto na cabeça do parafuso até o alargamento do diâmetro do colar aprisionando as chapas.

Os *lockbolts* utilizados são de aço inoxidável ou das ligas de alumínio 2024-T4, 6061-T6 e 7075-T73.

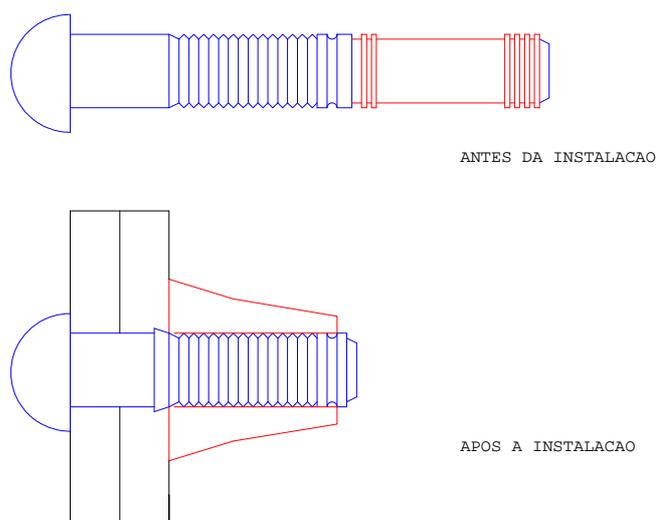


Figura 7.3: Parafuso *lockbolt*.

Em ligações parafusadas deve-se prever que todos os parafusos entrem em escoamento antes do colapso da ligação, deste modo as ligações parafusadas devem ter um número máximo de parafusos procurando que todos os parafusos sejam solicitados simultaneamente sem grandes diferenças de solicitações entre os primeiros e os últimos parafusos da linha. O número máximo de parafusos para que se verifique este fato, de maneira prática e como nas estruturas de aço, é de seis parafusos alinhados.

Outra recomendação importante, é feita com relação ao torque dos parafusos de alumínio, de modo geral, que deve ser aplicado com torquímetro, geralmente regulado para 75% do torque de ruptura do parafuso, evitando-se assim apertos excessivos.

Os parafusos com rosca soberba ou auto-atarraxantes (*screws*) são muitos utilizados para conectar telhas e painéis em geral aos elementos de alumínio. São empregadas ligas de alumínio como a 7075-T73 ou aços inoxidáveis da série 300. Esses parafusos são classificados em dois tipos:

- tipo A (ponta cônica): empregados usualmente nas conexões entre elementos de pequena espessura, como por exemplo na conexão telha-terça ou mesmo na junção entre telhas na região de sobreposição.
- tipo B (ponta chata): empregado na conexão entre telhas ou painéis aos elementos principais da estrutura, ou seja, elementos com espessura relativamente elevada. São conhecidos como parafusos auto-perfurantes (*self-tapping*).

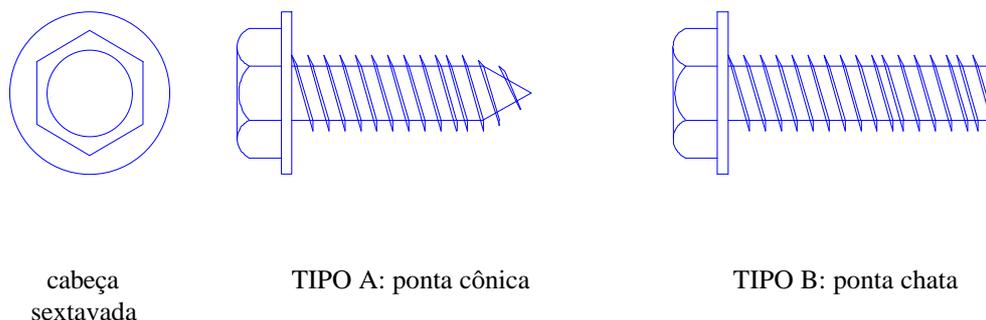


Figura 7.4: Parafusos auto-atarraxantes.

7.1.3. Ligações por Pinos

As ligações por pinos também são muito empregadas nas estruturas de alumínio, seja com pinos de alumínio ou aço inoxidável. Tais ligações em geral são especificadas para os apoios (aparelhos de apoio) ou mesmo entre partes relativamente grandes da estrutura, conferindo o comportamento de uma rótula. Os pinos são de fácil fabricação, havendo a possibilidade de especificar grandes diâmetros para atender às situações de esforços elevados.

7.2. Escolha do Material dos Elementos de Ligação

Para as estruturas de aço a escolha do material dos parafusos, pinos ou rebites parece bastante óbvia ao passo que se escolhe apenas o aço a ser utilizado em função da resistência dos elementos, compatibilizada com a definição do esquema de ligação.

No caso das estruturas de alumínio, os elementos de ligação (parafusos, rebites e pinos) podem ser tanto de alumínio quanto de aço, em função das características da ligação e das condições ambientais em que a estrutura se encontra.

Condições ambientais que são apropriadas para o alumínio podem resultar extremamente agressivas para o aço.

Também a ocorrência da corrosão galvânica, nas ligações em que se utiliza diferentes materiais, torna-se um ponto importante a ser considerado na utilização de conectores de aço para as ligações de elementos de alumínio. Neste caso o aço inoxidável pode minimizar este efeito devido às suas características obtidas com tratamento eletroquímico.

As ligas de alumínio utilizadas para os conectores podem apresentar maior ou menor resistência à corrosão independentemente das características do metal base. As ligas 2024 e 7075 apresentam maior resistência mecânica que a liga 6061, porém a resistência à corrosão é menor, sendo entretanto utilizadas em muitas aplicações. Em alguns casos os conectores são submetidos ao processo de anodização conferindo-lhes maior resistência a corrosão.

7.3. Propriedades Mecânicas dos Conectores

As propriedades mecânicas mínimas admitidas para parafusos de alumínio são apresentadas na norma da AA, como resistências mínimas à tração e ao cisalhamento, podendo também ser encontradas na ASTM F468 “*Nonferrous Bolts, Hex Cap Screws, and Studs for General Use*” (1990) e na ASTM F467, “*Nonferrous Nuts for General Use*” (1990), para as porcas de alumínio.

Em função da liga utilizada, cada parafuso apresenta um código, segundo a ASTM F468 (1990), dado na tabela 7.1.

Tabela 7.1: Código de marcação de parafusos segundo a ASTM F468.

Marcação	Liga de Alumínio
F468X	2024-T4
F468Y	6061-T6
F468Z	7073-T73

Para os rebites a mínima resistência à tração e ao cisalhamento são apresentadas na norma da AA, cujo os valores são resumidos na tabela 7.2 seguinte.

Tabela 7.2: Resistência mínima à tração e ao cisalhamento para rebites de ligas de alumínio (aplicáveis a diâmetros variando entre 1/4" e 1").

Liga e Têmpera	Resistência à Tração (MPa)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)
2017-T4	385	231
2024-T4	434	259
2117-T4	266	182
2219-T6	385	210
6053-T61	210	140
6061-T6	294	175
7050-T7	490	273
7075-T6	539	294
7075-T73	476	287
7178-T6	588	322

As resistências mínimas para os parafusos de aço inoxidável são dadas na ASTM F593 “*Stainless Steel Bolts, Hex Cap Screws, and Studs*” (1991). Estas resistências variam em função das ligas, condições de tratamento e diâmetro dos parafusos. Na tabela 7.3 é possível observar o exemplo desta variação de resistência em função do diâmetro e das condições de tratamento da liga designada por um código de letras.

Tabela 7.3: Resistências à tração e ao cisalhamento para parafusos de aço inoxidável das ligas 303, 304 e 316.

Condições de tratamento (ASTM-F593)	Diâmetro nominal (mm)	Resistência à tração (MPa)	Resistência ao cisalhamento (MPa)
A	6,3 a 38	525	315
CW1	6,3 a 16	700	420
CW2	19 a 38	595	357
SH1	6,3 a 16	840	504
SH2	19 a 25	770	464

Para as porcas de aço inoxidável tem-se as especificações da ASTM F594, agrupando as porcas das ligas 303 e 304 em um grupo denominado 1 e as das ligas 316 em um grupo denominado 2.

Os parafusos de aço mais usualmente empregados em estruturas são os parafusos A307 (parafusos comuns) e A325 (parafusos de alta resistência).

De modo geral, a deformação sob escoamento no cisalhamento é muito pequena em parafusos não sendo verificada. Considerando como exemplo um parafuso de diâmetro 3/4” (19mm) sob escoamento em cisalhamento, observa-se uma deformação de 0,2%, isto é, 0,038 mm, que é um valor bem menor do que a folga recomendada nos furos padrão igual a 1,6 mm. Por este motivo a norma da AA, assim como as especificações para

elementos de aço do AISC, AISI e ASCE, não limitam a resistência dos conectores em função do escoamento.

7.4. Furos

O procedimento de furação nas ligações parafusadas e rebitadas em estruturas de alumínio é similar, de maneira geral, ao das estruturas de aço. A norma da AA estabelece que nas ligações parafusadas, o diâmetro do furo padrão não exceda o diâmetro nominal do parafuso acrescido de 1,6 mm (1/16").

Furos alargados ou alongados são permitidos, embora não recomendados. Os furos alongados são permitidos apenas nos casos onde haja garantia que a solicitação no parafuso seja perpendicular à direção alongada.

Para as ligações rebitadas, o diâmetro máximo do furo deve ser no máximo 4% maior que o diâmetro nominal do rebite.

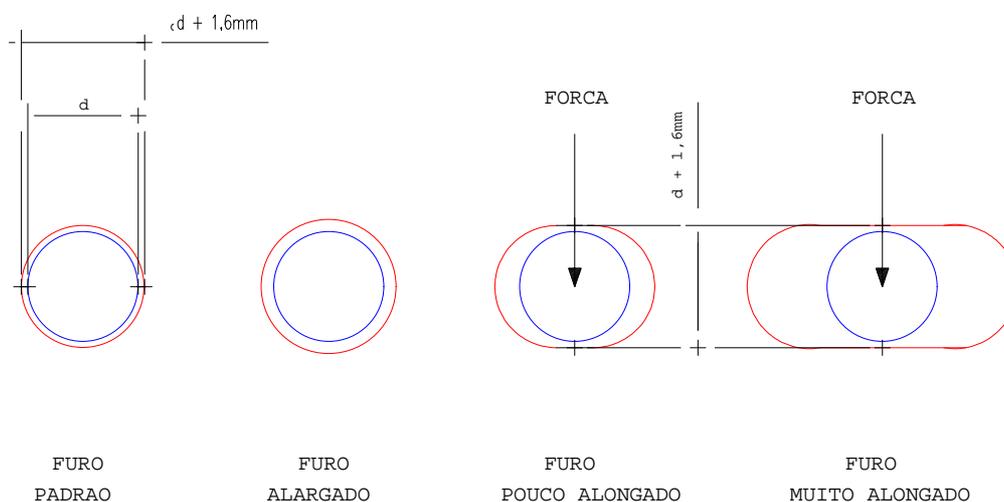


Figura 7.5: Tipos de furos para parafusos.

Quanto a execução, os furos devem ser preferencialmente puncionados de maneira a se obter maior rendimento na fabricação. Entretanto, nos casos em que a espessura do material base for superior ao diâmetro do furo, o

puncionamento pode acarretar rasgamento da parede posterior do furo (figura 7.6), portanto deve-se executar um pré-furo com diâmetro igual ao diâmetro final do furo subtraído de um quarto da espessura do material base ou 0,8 mm (1/32”), o que for menor. Em seguida o furo é alargado até atingir o diâmetro desejado.

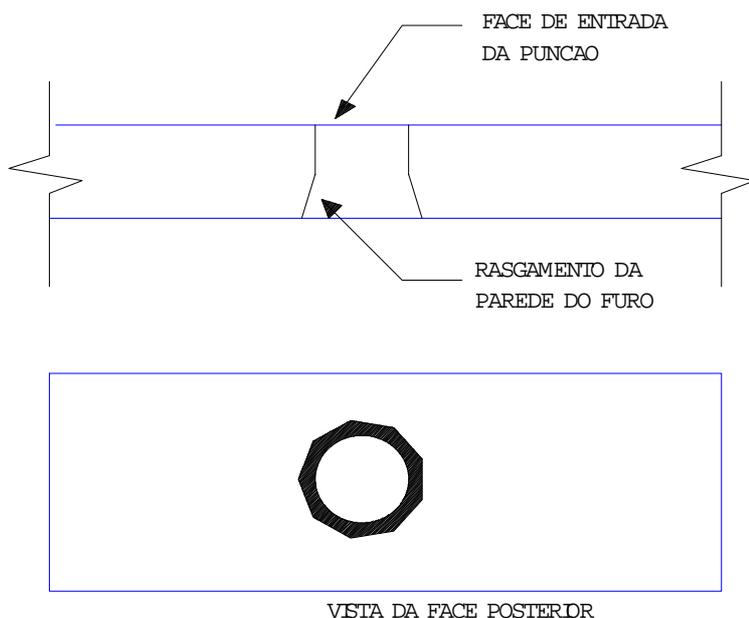


Figura 7.6: Rasgamento da face posterior do furo puncionado.

Para efeito de cálculo da área líquida do elemento conectado, a norma da AA recomenda que o diâmetro do furo puncionado seja acrescido de 0,8 mm (1/32”), de maneira a desprezar a borda do furo danificada pelo puncionamento.

As normas do AISC recomendam, independentemente do processo de execução do furo, que o diâmetro empregado no cálculo da área efetiva seja sempre acrescido de 1,6 mm (1/16”).

7.5. Modos de Falha nas Ligações Parafusadas ou Rebitadas

Os modos de falha para solicitação perpendicular ao eixo do parafuso ou rebite, prováveis nas ligações entre elementos de alumínio, são os comumente encontrados nas ligações de elementos metálicos de modo geral (figura 7.7), destacando-se:

1. falha por cisalhamento do conector,
2. esmagamento do metal base,
3. ruptura do metal base na seção líquida e
4. rasgamento do metal base entre furo e borda (ou entre furos).

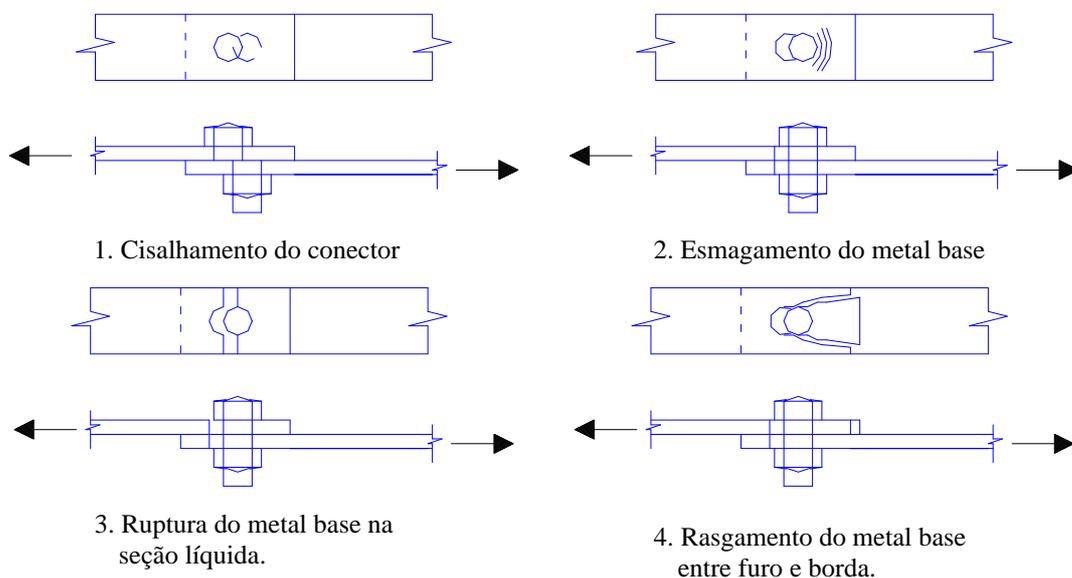


Figura 7.7: Modos de falha em ligações parafusadas.

Para dimensionar uma ligação com parafusos, rebites ou pinos, além do modo de falha que irá se estabelecer é necessário buscar as características próprias do tipo de material do conector. Deste modo tem-se:

1. Conectores de alumínio:

A norma da AA estabelece um fator de segurança igual a 2,34 aplicável na tração e no cisalhamento, para parafusos e rebites em estruturas de edifícios.

No caso de parafusos auto-atarraxantes, o fator de segurança especificado é igual a 3,0.

2. Conectores de aço inoxidável:

O dimensionamento de conectores de aço inoxidável utilizados em estruturas de alumínio é especificado em ASCE 8-90 “*Specifications for Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members*” (1991). O fator de segurança estabelecido é igual a 3,0 para tração e cisalhamento. As especificações para o aço inoxidável não prevêm uma resistência mínima ao cisalhamento, de modo que a ASCE 8-90 (1991) estabelece uma relação entre a resistência mínima ao cisalhamento e à tração, igual a 0,6.

3. Conectores de aço carbono:

As especificações para os conectores de aço carbono em estruturas de alumínio são as mesmas das estruturas de aço. As especificações do AISC são aplicáveis na maioria dos casos, sendo que a AAMA “*Metal Curtain Wall Fasteners Report*”(1991) apresenta recomendações de cálculo para parafusos não mencionados no AISC.

7.6. Parafusos Submetidos à Tração

O cálculo da área efetiva à tração é diferente no caso de parafusos de aço e de alumínio. Para os parafusos de aço, conforme ASTM - rosca UNC, a área efetiva à tração é dada pela expressão 7.1.

$$A_r = 0,7854 \left(d - \frac{0,9743}{n} \right)^2 \quad (7.1)$$

Onde:

A_r - área efetiva à tração (pol²)

d - diâmetro nominal do parafuso (pol)

n - número de fios de rosca por pol.

O resultado desta equação é tabelado no AISC-ASD (1989) para o caso de parafusos com rosca grossa e é o mesmo apresentado para conectores de aço inoxidável tabelado na ASTM F593 “*Stainless Steel Bolts, Hex Cap, Screws and Studs*” (1991), para as séries de roscas grossa e fina.

No caso de parafusos de alumínio a da área efetiva à tração é calculada pela expressão 7.2, resultando em valores 10% menores que para os parafuso de aço.

$$A_r = 0,7854 \left(d - \frac{1,2269}{n} \right)^2 \quad (7.2)$$

A tabela 7.4 apresenta os valores de área efetiva à tração para parafusos de aço e alumínio de diferentes diâmetros, com unidades convertidas para o sistema internacional.

Tabela 7.4: Áreas efetivas à tração dos parafusos de aço e alumínio.

Áreas resistentes para parafusos de aço e alumínio				
diâmetro nominal (d)	fios de rosca /cm (n)	área bruta nominal (A_p) [mm^2]	área efetiva à tração (A_r) [mm^2]	
			parafusos de aço	parafusos de alumínio
1/4" (6,3 mm)	7,9 (20/pol)	31,7	20,5	18,1
3/8" (9,5 mm)	6,3 (16/pol)	71,2	50,0	45,0
1/2" (12,7 mm)	5,1 (13/pol)	126,6	91,6	83,2
5/8" (16,0 mm)	4,3 (11/pol)	197,9	145,8	133,5
3/4" (19,0 mm)	3,9 (10/pol)	285,0	215,5	199,3
7/8" (22,2 mm)	3,5 (9/pol)	387,9	298,0	276,8
1" (25,4 mm)	3,1 (8/pol)	506,7	391,0	363,2
1 1/4" (32,0 mm)	2,7 (7/pol)	791,6	625,2	—

É importante salientar que não existem diferenças de ordem geométrica entre os parafusos de aço e alumínio, e sim apenas na expressão para o cálculo da área efetiva à tração.

7.7. Parafusos Submetidos à Força Cortante

O procedimento para determinação da resistência à força cortante em parafusos de alumínio é diferente do tradicionalmente empregado pelo AISC-ASD, que adota sempre como referência a área bruta do parafuso, diferenciando a tensão admissível para os casos de rosca inclusa ou exclusiva ao plano de corte.

Por outro lado, a norma da AA estabelece sempre a mesma tensão admissível ao cisalhamento, diferenciando a área efetiva ao cisalhamento do parafuso. Assim para o caso de rosca exclusiva, a área efetiva ao cisalhamento é a própria área bruta (nominal) do parafuso, enquanto que no caso de rosca inclusa, emprega-se uma área efetiva que evidentemente é menor que a área bruta. A tabela 7.5 apresenta os valores da força cortante admissível em parafusos para diferentes ligas de alumínio.

Tabela 7.5: Força cortante admissível (em kN) para parafusos de alumínio nos diâmetros e ligas mais utilizados.

Parafusos de alumínio: diâmetro nominal	liga 2024 -T4		liga 6061-T6		liga 7075-T73	
	rosca inclusa	rosca exclusa	rosca inclusa	rosca exclusa	rosca inclusa	rosca exclusa
1/4" (6,3 mm)	2,03	3,56	1,40	2,43	2,25	3,96
5/16" (8,0 mm)	3,33	5,40	2,30	3,78	3,74	6,30
3/8" (9,5 mm)	4,95	8,11	3,47	5,40	5,85	9,01
1/2" (12,7 mm)	9,46	13,96	6,30	9,91	10,36	15,76
5/8" (16,0 mm)	14,86	22,07	10,36	15,31	16,66	24,77
3/4" (19,0 mm)	22,07	31,97	15,31	22,07	25,22	36,03
7/8" (22,2 mm)	31,07	43,23	21,17	29,72	34,68	49,54
1" (25,4 mm)	40,53	58,54	27,92	38,73	45,03	63,05

Nota:

rosca inclusa - condição em que o plano de cisalhamento passa pela rosca.

rosca exclusiva - condição em que o plano de cisalhamento não passa pela rosca.

7.8. Parafuso Submetidos à Tração e Força Cortante

A norma da AA não apresenta requisitos para a verificação de parafusos de alumínio submetidos à tração e força cortante combinados. As normas de estruturas de aço (inclusive de aço inoxidável) prevêm este caso, apresentando expressões de interação para o efeito combinado de tração e cortante, as quais evidentemente podem ser utilizadas para os parafusos de aço carbono ou aço inoxidável empregados nas estruturas de alumínio.

A análise experimental demonstra que a interação entre tração e cortante em parafusos de aço pode ser razoavelmente ajustada por uma curva circular (expressão 7.3), ou por três trechos lineares (figura 7.8), o que tem sido atualmente adotado pelas normas.

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_a}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_a}\right)^2 \leq 1,0 \quad (7.3)$$

Onde:

σ - tensão normal no parafuso,

τ - tensão de cisalhamento no parafuso,

σ_a - tensão admissível à tração,

τ_a - tensão admissível ao cisalhamento.

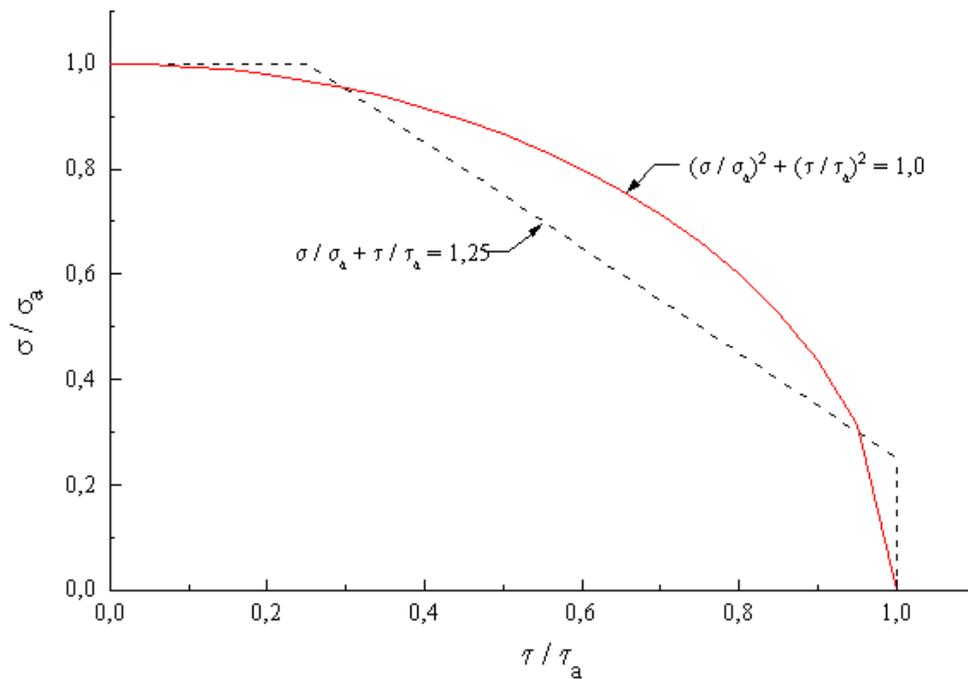


Figura 7.8: Interação entre tração e cortante em parafusos.

7.9. Pressão de Contato em Furos e Distância entre Furo e Borda

A pressão de contato na parede do furo que é um modo de falha associado ao esmagamento do metal base, deve ser verificada com base numa área efetiva de pressão de contato associada ao diâmetro do furo no caso de ligações rebitas (sem exceder 4% do diâmetro nominal do rebite), ou ao diâmetro do parafuso no caso das ligações parafusadas.

De acordo com a norma da AA, a pressão de contato não pode ultrapassar a tensão admissível ao esmagamento, dada pelo menor valor entre:

$$\frac{f_{by}}{(FS)_y} = \frac{f_{by}}{1,65} \quad (7.4)$$

ou

$$\frac{f_{bu}}{1,2(FS)_u} = \frac{f_{bu}}{1,2(1,95)} \quad (7.5)$$

Por exemplo para a liga 6061-T6 tem-se:

$$\frac{f_{by}}{1,65} = \frac{40}{1,65} = 24,4 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

ou

$$\frac{f_{bu}}{1,2(1,95)} = \frac{61}{1,2(1,95)} = 26 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

O que resulta na tensão admissível ao esmagamento igual a 24,4 kN/cm².

As tensões admissíveis devem ser reduzidas em 33% no caso de parafusos em furos alongados ou no caso de pinos. Nos furos alongados, a área de contato é menor que no furo padrão, uma vez que a superfície de contato é plana e não cilíndrica. No caso de pinos, a redução é aplicada pois em geral trata-se de dispositivos que aparecem isoladamente nas ligações, ou seja sem redundância estrutural.

A possibilidade de rasgamento entre furos e borda, que constitui outro modo de falha, não necessita ser verificada se a distância entre o centro do furo e a borda, na direção da sollicitação, não for inferior a 2d (d é o diâmetro do parafuso). A norma da AA permite que esta distância seja reduzida para 1,5d se a tensão admissível à pressão de contato for reduzida em 25%.

7.10. Espaçamento Mínimo entre Conectores e Distância à Borda

O espaçamento entre conectores ou entre conectores e borda tem aproximadamente os mesmos valores usualmente adotados para as estruturas

de aço. A norma da AA admite um espaçamento mínimo entre parafusos igual a $2,5d$ e entre rebites igual a $3d$, sendo d o diâmetro nominal do parafuso ou do rebite.

A distância mínima entre furo e borda, na direção da solicitação deve ser especificada como $2d$. Conforme já foi discutido no item 7.9, esta distância pode ser reduzida para $1,5d$, desde que seja aplicada uma redução na tensão admissível ao esmagamento de 25%.

Segundo KISSEL & FERRY (1995), os projetistas usualmente especificam a distância entre furo e borda igual a $2d$ na direção da solicitação, portanto sem a necessidade de reduzir a tensão admissível ao esmagamento; e igual a $1,5d$ na direção perpendicular à solicitação (figura 7.9).

A tabela 7.6 apresenta os valores mínimos de espaçamento entre furos e da distância à borda para alguns diâmetros de parafusos.

Tabela 7.6: Distâncias mínimas entre furos e entre furo e borda para parafusos de diâmetros mais empregados.

Diâmetro Nominal do Parafuso (d)	Distância Mínima à Borda ⁽¹⁾ (mm) 1,5 d	Distância Mínima à Borda ⁽²⁾ (mm) 2 d	Espaçamento Mínimo entre Furos (mm) 2,5 d
1/4" (6,3 mm)	10	12,5	15
3/8" (9,5 mm)	15	20	25
1/2" (12,7 mm)	20	25	30
5/8" (16,0 mm)	25	30	40
3/4" (19,0 mm)	30	40	50
7/8" (22,2 mm)	35	45	55
1" (25,4 mm)	40	50	65

Nota:

(1) com redução da tensão admissível ao esmagamento.

(2) sem redução da tensão admissível ao esmagamento.

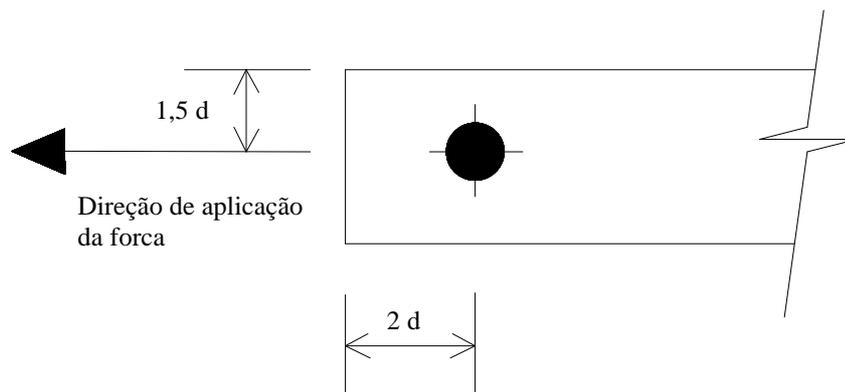


Figura 7.9: Distâncias entre furo e borda recomendadas pela norma da AA.

7.11. Espaçamento Máximo entre Conectores e Distância à Borda

Em peças compostas ou ligações com cobrejuntas, submetidas à compressão, deve-se limitar o espaçamento entre conectores a um valor máximo, de maneira a se evitar a flambagem do elemento entre conectores.

A norma da AA estabelece que o trecho comprimido do elemento entre conectores deve ser verificado, mas não apresenta recomendações quanto ao espaçamento máximo a ser adotado nos projetos. O *Alcoa Structural Handbook* (1960), citado em KISSEL & FERRY (1995), recomenda que o espaçamento entre conectores ao longo das bordas não enrijecidas, não deve exceder $4d$ e $10t$, sendo d o diâmetro nominal do conector e t a espessura do elemento. De maneira análoga, recomenda que a distância entre furo e borda não deva ultrapassar $1,5d$ e $4t$.

É importante notar que as recomendações anteriores são aplicáveis apenas aos casos onde possa ocorrer a flambagem do elemento. Nos elementos de aço, estes espaçamentos máximos devem ser sempre garantidos, de maneira a se evitar o aparecimento de frestas e a conseqüente corrosão. O AISC-ASD (1989) por exemplo, estabelece que a distância entre furo e borda não deve exceder o menor valor entre $12t$ e

150 mm. No alumínio, esta preocupação ganha importância nas ligas menos resistentes à corrosão, como por exemplo 2014-T6.

7.12. Parafusos Auto-atarraxantes

A última edição da norma da AA (6ª edição) apresenta requisitos para a verificação de ligações ente elementos de alumínio empregando os parafusos auto-atarraxantes (com rosca soberba). Os modos de falha observados nesse tipo de ligação estão descritos a seguir e ilustrados na figura 7.10:

- *Pull-out*: é o arrancamento do parafuso por tração associado à ruptura do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso.
- *Pull-over*: é o arrancamento do parafuso por tração associado à ruptura do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso.
- *Tilting*: é a inclinação excessiva do parafuso por efeito de cisalhamento.

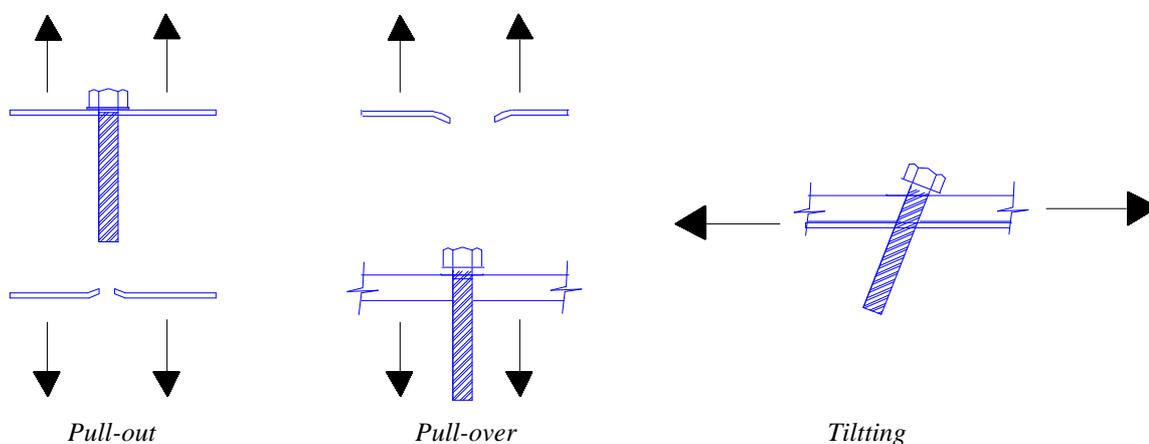


Figura 7.10: Modo de falha nos parafusos auto-atarraxantes.

7.12.1. Tração

- (1) Determinar a resistência à tração do próprio parafuso (R_{st}), que pode ser avaliada por ensaios ou com base na seguinte expressão:

$$R_{st} = A_r f_{us} / 1,25 \quad (7.6)$$

Onde:

A_r - área efetiva do parafuso

f_{us} - resistência à tração do parafuso

(2) Determinar a resistência ao arrancamento (*pull-out*), dada por:

$$R_{out} = 0,85 t_c d f_{tu2} \quad (7.7)$$

Onde:

t_c - comprimento de rosca atarraxado ao elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso

d - diâmetro nominal do parafuso

f_{tu2} - resistência à tração do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso

(3) Determinar a resistência ao arrancamento (*pull-over*), dada por:

$$R_{over} = C t_1 f_{tu1} (d_{ws} - d_h) \quad (7.8)$$

Onde:

$C = 0,7$ para ligações cujos elementos conectados não estejam em contato

$C = 1,0$ para os demais casos

t_1 - espessura do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso

f_{tu1} - resistência à tração do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso

d_{ws} - maior valor entre o diâmetro da cabeça do parafuso ou o diâmetro da arruela, não devendo-se tomar valor maior que 12,5 mm (1/2")

d_h - diâmetro nominal do furo

(4) Determinar a resistência admissível à tração, dada pelo valor entre R_{st} , R_{out} e R_{over} dividido pelo fator de segurança, igual a 3,0 nesse caso.

7.12.2. Cisalhamento

(1) Determinar a resistência ao cisalhamento do próprio parafuso (R_{sv}), que pode ser avaliada por ensaios ou com base na seguinte expressão:

$$R_{sv} = 0,48A_r f_{us} \quad (7.9)$$

- (2) Determinar a resistência ao cisalhamento da ligação (contato entre parafuso e metal base), que corresponde ao menor valor obtido pelas expressões apresentadas na tabela 7.7.

Tabela 7.7: Resistência ao cisalhamento de parafusos auto-atarraxantes: contato entre parafuso e metal base.

Modo de Falha	Expressão
Escoamento do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso	$R_{sy1} = 1,82df_{by1}t_1$ (7.10)
Escoamento do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso	$R_{sy2} = 1,82df_{by2}t_2$ (7.11)
Ruptura do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso	$R_{su1} = 1,28df_{bu1}t_1$ (7.12)
Ruptura do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso	$R_{su2} = 1,28df_{bu2}t_2$ (7.13)
<p>Onde:</p> <p>d - diâmetro nominal do parafuso</p> <p>t₁ - espessura do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso</p> <p>t₂ - espessura do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso</p> <p>f_{by1} - resistência ao escoamento por esmagamento do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso</p> <p>f_{by2} - resistência ao escoamento por esmagamento do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso</p> <p>f_{bu1} - resistência à ruptura por esmagamento do elemento que está em contato com a cabeça do parafuso</p> <p>f_{bu2} - resistência à ruptura por esmagamento do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso</p>	

- (3) Se o elemento em contato com a cabeça do parafuso for o de maior espessura (t₂ < t₁), deve-se verificar a possibilidade de inclinação excessiva do parafuso (*tilting*), com base na determinação de uma resistência dada por:

$$R_{til} = 4,2(t_2^3 d)^{0,5} f_{tu2} \quad (7.14)$$

- (4) Determinar a resistência admissível ao cisalhamento, dada pelo menor valor entre os obtidos em (1), (2) e (3), dividida pelo fator de segurança igual a 3,0 nesse caso.

7.2. Ligações Soldadas

A soldagem dos metais altera as propriedades mecânicas na região da solda, devido principalmente às elevadas temperaturas aplicadas nessa região, necessárias para fundir o metal base e o metal da solda. Este fato pode comprometer o comportamento estrutural e é de conhecimento dos projetistas de estruturas metálicas, faltando porém um conhecimento mais avançado da metalurgia de soldagem. Em outras palavras, o projeto estrutural e até mesmo a fabricação de ligações soldadas em geral são conduzidos por engenheiros civis, que não possuem formação nesta área. Nas estruturas de maior porte, é importante a participação de especialistas em soldagem de maneira a definir adequadamente o processo de soldagem, os tipos de junta, os consumíveis, etc.

Nas estruturas de alumínio, a preocupação deve ser ainda maior. O calor introduzido pela soldagem altera de maneira significativa a resistência das ligas, reduzindo no caso da liga 6061-T6 por exemplo, em torno de 40% a resistência ao escoamento e resistência à ruptura por tração.

Os processos de soldagem mais empregados são a soldagem com arco elétrico com proteção gasosa, usualmente denominado de processo MIG (gás inerte); e o processo TIG que consiste na união de metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça. Segundo CUNHA (1985), a proteção durante a soldagem é conseguida com um gás inerte, ou mistura de gases inertes, que também tem a função de transmitir a corrente elétrica quando ionizados durante o processo. A soldagem pode ser feita com ou sem metal de adição.

A escolha adequada do eletrodo é de fundamental importância para o bom desempenho da junta soldada. A norma da AA apresenta uma tabela de compatibilidades entre o material do eletrodo e o metal base. Além da resistência há outros fatores a

considerar, como a ductilidade (dureza elevada induz a trincas no cordão de solda), a resistência à corrosão, desempenho à alta temperatura, etc. Por exemplo, eletrodos com mais de 3% de magnésio (ligas 5183, 5356, 5556 e 5554) não são recomendados para temperaturas de serviço acima de 65 °C. Nesse caso recomenda-se a liga 5554.

A norma da AA apresenta a resistência ao cisalhamento dos eletrodos mais utilizados (tabela 7.8), e a tabela 7.9 as resistências de algumas ligas (metal base) na região da solda.

Tabela 7.8: Resistências ao cisalhamento para os eletrodos mais empregados.

Liga do eletrodo	Resistência ao cisalhamento - f_{su} (MPa)
1100	52,5
4043	80
5183	130
5356	119
5554	119
5556	140
5654	84

Tabela 7.9: Resistências de algumas ligas na região da solda.

Liga	f_{tyw} (MPa)	f_{tuw} (MPa)	f_{syw} (MPa)	f_{suw} (MPa)
1100-H4	31,5	77	17,5	56
3003-H14	49	98	28	70
3003-H16	49	98	28	70
3004-H16	77	147	45,5	91
3004-H34	77	147	45,5	91
5005-H14	49	98	28	63
5050-H34	56	126	31,5	84
5052-H34	91	175	52,5	112
5083-H111	147	273	84	161
5083-H116	168	280	98	168
5086-H34	133	245	77	147
5086-H111	126	245	70	147
5086-H116	133	245	77	147
5454-H111	112	217	66,5	133
5454-H34	112	217	66,5	133
5456-H111	168	287	98	168
5456-H114	182	294	105	175
6005-T5	119	168	70	105
6061-T6	140	167	83	104
6063-T5	77	119	45,5	77
6063-T6	77	119	45,5	77

A identificação da junta soldada em estruturas de alumínio é padronizada pela *American Welding Society* (AWS), de maneira similar à das estruturas de aço. Há dois

tipos básicos de solda usualmente especificados nas estruturas: solda de topo e solda de filete.

Solda de topo: são empregadas para ligação de topo entre dois elementos. Para espessuras elevadas torna-se necessário executar preparo da superfície (chanfro), similar às estruturas de aço, conforme ilustra a figura 7.11. A resistência admissível de uma solda de topo deve ser tomada como o menor valor entre:

$$\frac{0,9f_{tuw}}{(FS)_u} \text{ e } \frac{f_{tyw}}{(FS)_y} \quad (7.15)$$

Onde:

f_{tuw} : resistência à ruptura por tração do metal base na região da solda

f_{tyw} : resistência ao escoamento do metal base na região da solda

$(FS)_u = 1,95$ (fator de segurança na ruptura)

$(FS)_y = 1,65$ (fator de segurança no escoamento)

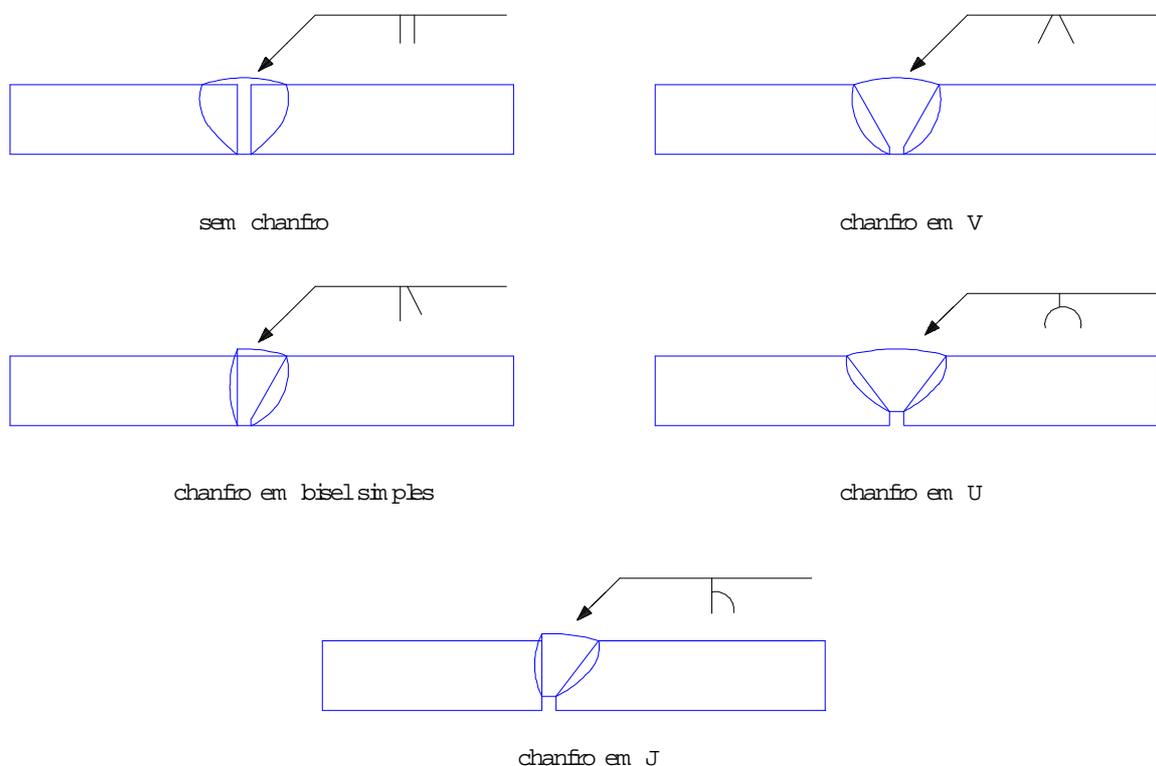


Figura 7.11: Exemplos de solda de topo.

Solda de filete: são empregadas nas juntas em T e nas juntas por sobreposição, não requerendo preparo da superfície. A figura 7.10 ilustra uma solda de filete indicando as principais dimensões e nomenclatura, que são idênticas à das estruturas de aço. A tensão na solda é calculada com base na garganta efetiva, que para filetes de pernas iguais, resulta igual a 0,7 vezes a perna (ou dimensão nominal) do filete. As tabelas 7.10 e 7.11 indicam as dimensões máximas e mínimas de filetes recomendados pela norma da AA. A resistência das soldas de filete é determinada com base em dois modos de falha: ruptura da solda na garganta efetiva, ou ruptura do metal base junto à solda. O fator de segurança é igual a 2,34 (20% maior que o fator de segurança na ruptura, empregado no dimensionamento de barras).

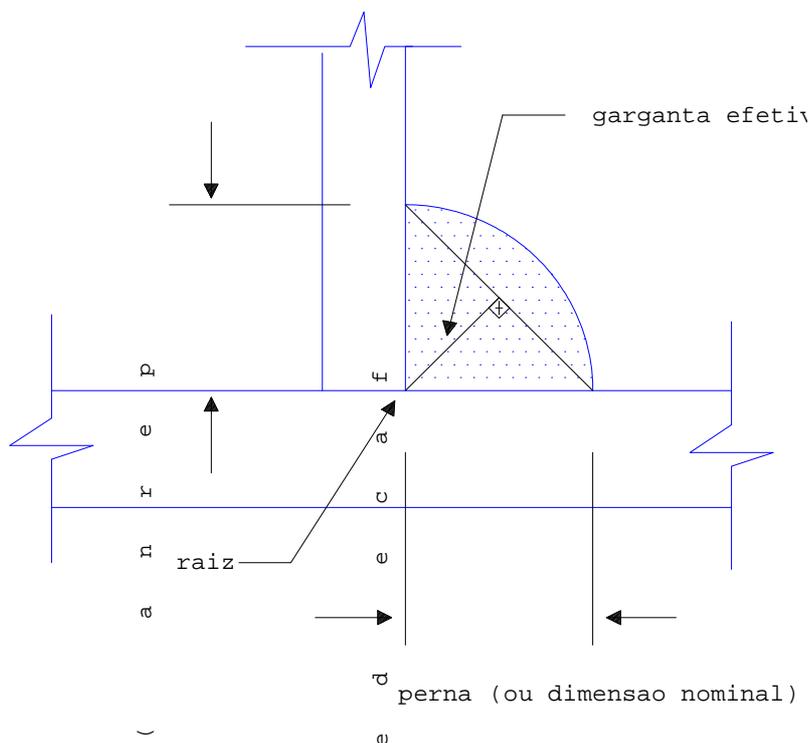


Figura 7.12: Solda de filete.

Tabela 7.10: Dimensão nominal máxima de filetes ao longo das bordas do metal base.

Espessura do metal base t (cm)	Dimensão nominal máxima do filete
$t < 0,63$	t
$t \geq 0,63$	t - 2 mm

Tabela 7.11: Dimensão nominal mínima de filetes.

Maior espessura do metal base na junta t (cm)	Dimensão nominal mínima do filete mm ⁽¹⁾
$t \leq 0,63$	3
$0,63 < t \leq 1,25$	5
$t > 1,25$	6
(1) A dimensão mínima não necessita exceder a menor espessura do metal base na junta.	

A resistência admissível de uma solda de filete deve ser tomada como o menor valor entre:

- ruptura por cisalhamento do filete na garganta efetiva

$$R_w = \frac{f_{su}}{2,34} \quad (7.16)$$

- ruptura por cisalhamento do metal base na face da fusão

$$R_{MB} = \frac{1,4f_{suw}}{2,34} \quad (7.17)$$

Onde:

R_w - resistência admissível da solda

R_{MB} - resistência admissível do metal base na face de fusão

f_{su} - resistência ao cisalhamento da solda, conforme tabela 7.8

f_{suw} - resistência à ruptura do metal base, conforme tabela 7.9

O fator 1,4 que aparece na expressão 7.15 refere-se a relação entre a dimensão nominal do filete (perna) e a garganta efetiva, uma vez que a tensão atuante na solda é sempre calculada com base na garganta efetiva.

8. Comentários Finais e Conclusões

8.1. Generalidades

O alumínio, ou mais precisamente as ligas de alumínio, apresentam características que o torna competitivo em muitas situações, correspondendo a um amplo campo de aplicação nas estruturas metálicas e na construção civil em geral.

Comparando o alumínio com seu “concorrente” direto, ou seja, um aço de mesma resistência ao escoamento, têm-se um material três vezes mais leve, porém com módulo de elasticidade três vezes menor. Para equiparar a “rigidez” de elementos estruturais equivalentes, é necessário consumir mais alumínio a um custo unitário que é maior que o do aço. Por essa análise simplista dificilmente a solução em alumínio seria vantajosa. Entretanto, em muitas situações o panorama se inverte quando fatores como a leveza e a resistência à corrosão são determinantes.

Outro aspecto favorável do alumínio em relação ao aço consiste na facilidade de produção de novos perfis, obtidos por extrusão em matrizes que são relativamente baratas. Este fato permite otimizar perfis a um custo bastante baixo, atendendo especificamente a um determinado projeto, o que não é possível ou viável no caso de perfis laminados de aço, cujo equipamento de laminação requer um investimento extremamente elevado.

No decorrer deste trabalho, observou-se uma carência de referências bibliográficas sobre a aplicação do alumínio em estruturas, inclusive por parte das usinas produtoras. A pesquisa bibliográfica acaba por conduzir a referências que tratam o alumínio sob o ponto de vista metalúrgico, o que não constitui o matéria deste trabalho. No campo da Engenharia de Estruturas, confundem-se muitas vezes as estruturas metálicas com as estruturas em aço.

A história das estruturas em alumínio é mais recente que a das estruturas de aço, e conseqüentemente as normas para projeto também. Tomando-se como exemplo os Estados Unidos, país com forte tradição em estruturas metálicas, a primeira norma para projeto de estruturas de aço foi publicada pelo AISC em 1923, enquanto que a primeira norma da AA é de 1967. O Brasil não dispõe de norma para projeto e execução de estruturas de alumínio e a Comunidade Européia somente em 1999 publicou o EUROCODE 9.

Neste trabalho procurou-se discutir os fundamentos teóricos do dimensionamento das estruturas em alumínio com base na norma norte-americana da AA, pois trata-se de uma norma conhecida e empregada em diversos países, além de apresentar forte similaridade com as normas do AISC, portanto de fácil interpretação por parte dos projetistas de estruturas de aço. Embora a sexta e última edição da norma da AA (1994) apresente os dois métodos de dimensionamento, este trabalho aborda apenas o tradicional método das tensões admissíveis, suficiente e compatível com a proposta deste trabalho.

8.2. Material

As ligas de alumínio não apresentam patamar de escoamento no diagrama tensão - deformação, sendo a resistência ao escoamento determinada de maneira convencional com base no método *off set* 0,2%. As ligas são divididas em duas categorias: as tratáveis termicamente e as não tratáveis termicamente.

Assim como nos projetos de estruturas de aço, é usual adotar um valor convencional para o módulo de elasticidade das ligas de alumínio, igual a 70.000 MPa, que corresponde a um terço do módulo de elasticidade do aço.

8.3. Barras Submetidas à Tração

O dimensionamento das barras tracionadas em alumínio é feito com base no escoamento ou ruptura na seção líquida efetiva, com fatores de segurança 1,65 para o escoamento e 1,95 para a ruptura, valores próximos aos adotados pelo AISC, 1,67 e 2,0 para o escoamento e ruptura respectivamente. É importante notar que a norma da AA não estabelece a verificação do escoamento na seção bruta, empregando a área líquida efetiva nas duas verificações.

Quanto à avaliação da área líquida efetiva, há algumas diferenças nos valores do coeficiente de redução da área líquida (C_t) em relação a norma do AISC.

8.4. Barras Submetidas à Compressão

A norma da AA estabelece curvas de flambagem, em termos de tensões admissíveis, constituídas de três trechos: escoamento, flambagem inelástica (reta) e flambagem elástica (hipérbole de Euler), com fatores de segurança igual a 1,65 para escoamento e 1,95 para flambagem. A clássica curva de flambagem do AISC-ASD apresenta apenas dois trechos: flambagem elástica (hipérbole de Euler), com fator de segurança igual a 1,92; e flambagem inelástica (parábola do 2º grau), com fator de segurança que varia entre 1,67 e 1,92.

As usinas produtoras também apresentam curvas de flambagem para cada liga e têmpera porém sem incorporar o fator de segurança às tensões, conduzindo a resultados ligeiramente diferentes dos obtidos pelas curvas da norma da AA.

Outro aspecto importante a comentar é a consideração do conceito de tensão admissível na avaliação da flambagem local de elementos enrijecidos e não

enrijecidos, não admitindo o conceito de largura efetiva, procedimento já consagrado nas normas de estruturas de aço. Em alguns casos, o comportamento pós-flambagem é admitido alterando-se a curva de flambagem elástica. A interação entre flambagem local e flambagem global é prevista nos casos onde a tensão admissível à flambagem local é inferior à tensão admissível à flambagem global, uma vez que nesses casos a “perda de rigidez” proveniente da flambagem local pode precipitar a flambagem global.

Outro aspecto importante observado, diz respeito aos enrijecedores de borda de perfis comerciais, que apresentam dimensões muito reduzidas e portanto baixa eficiência estrutural como elemento enrijecedor de mesa. Este fato pode ser visualizado com o exemplo desenvolvido no capítulo 4, aplicando-se o procedimento da AA.

8.5. Barras Submetidas à Flexão Simples e à Flexão Composta

Analogamente à verificação das barras comprimidas, a flambagem local (FLM e FLA) é analisada com base em tensões admissíveis à flambagem local, não sendo previsto o conceito de largura efetiva.

A flambagem lateral com torção (FLT) é analisada pelo clássico procedimento do AISC-ASD, verificando-se a porção comprimida da viga como barra submetida à compressão. Entretanto, diferentemente da norma do AISC, a norma da AA prevê os casos de carregamento atuando no centro de torção, na mesa superior e na mesa inferior, podendo conduzir a valores bem diferentes da tensão crítica em alguns casos.

A expressão para cálculo do coeficiente de equivalência de momentos C_b já é a nova expressão apresentada pelo AISC-LRFD/93 e pelo AISI/96, aplicável a

qualquer tipo de carregamento e não somente a casos de distribuição linear de momento conforme estabelecia a antiga expressão.

Fenômenos como enrugamento da alma (*web crippling*) e a interação entre flexão e enrugamento da alma também são previstos e requerem cuidados especiais nas vigas de alumínio.

A verificação da força cortante é similar à prevista no AISC-ASD, admitindo-se indiretamente o comportamento pós-flambagem (campo de tração) no caso de almas com enrijecedores, adotando-se uma curva de flambagem mais “elevada”. Destaca-se ainda a condição de engastamento parcial considerada pela norma da AA na vinculação da chapa de alma, conduzindo a valores ligeiramente maiores que os obtidos pela norma do AISC.

O procedimento de verificação das barras submetidas à flexão composta é totalmente análogo ao da norma do AISC, empregando-se os mesmos critérios e expressões de interação.

8.6. Ligações

Assim como nas estruturas de aço, as estruturas de alumínio podem ser rebitadas, parafusadas e soldadas. Nas ligações com conectores, destaca-se a rebiteagem a frio, processo ainda muito empregado no alumínio.

Com relação a soldagem, se nas estruturas de aço simplifica os detalhes e consiste num processo relativamente barato e muito difundido, no alumínio o custo é relativamente elevado e requer mão-de-obra muito especializada, o que tem inviabilizado economicamente a soldagem como dispositivo de ligação nas estruturas voltadas a construção civil.

Além dos rebites, os parafusos de alumínio, de aço galvanizado, e de aço inoxidável, têm sido largamente empregados nas estruturas, com resultados satisfatórios do ponto de vista estrutural e de durabilidade.

Os critérios de projeto da norma da AA, para ligações parafusadas e soldadas, são similares aos apresentados na norma do AISC. É importante registrar que o alumínio quando soldado apresenta uma redução significativa (da ordem de 40%) na resistência, o que pode muitas vezes inviabilizar tal solução.

8.7. Continuação do trabalho

Apresenta-se a seguir uma sugestão de temas para futuros trabalhos:

- complementação da revisão bibliográfica sobre dimensionamento, abordando o recente EUROCODE 9 e o dimensionamento em situação de incêndio;
- análise estrutural (teórica e experimental) dos perfis disponíveis no mercado com relação aos enrijecedores de borda, que são relativamente pequenos e conseqüentemente de baixa eficiência estrutural;
- estudo criterioso dos sistemas estruturais em alumínio, com o objetivo de analisar e propor soluções viáveis (perfis e suas ligações) para a aplicação do alumínio na construção civil.

Bibliografia

ABDO, N. A. (1983). *Estruturas de Alumínio*. São Paulo, S.P.. Pini.

ALUMINUM ASSOCIATION, (1993). *Aluminum Standards and Data*. 11th ed., Washington, DC. August, 1993.

ALUMINUM ASSOCIATION, (1994). *Aluminum Design Manual*. Washington, DC.

ALUMINUM COMPANY OF CANADA LTD, (1944). *Handbook of Aluminum Alloys*. 1st ed., Canada. August, 1944.

ALUMINUM STRUCTURES, (1987). *Advances, Design and Construction*. Edited by: R. Narayanan. *Proceeding of International Conference of Steel and Aluminum Structures*. Cardiff, UK. 8-10 July 1987.

ALUMINUM STRUCTURES, (1991). *Recent Research and Developments*. Edited by: S. L. Lee and N. E. Shanmugam. *Proceeding of International Conference of Steel and Aluminum Structures*. Singapore. 22-24 May 1991.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, AISI (1986). *Specifications for Design Cold Formed Steel Structural Members*. August, 1986 ed., with December, 1989 Addendum, Washington, DC.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, *Manual of Steel Construction, Allowable Stress Design*, 9th ed., Chicago, 1989.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, ANSI H35.1(1993), *Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum*. New York. 1993.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM B557, *Tension Testing Wrought and Casting Aluminum and Aluminum-Alloy Rivets and Cold-Heading Wire and Rods*
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM B565 (1993), *Shear Testing of Aluminum and Aluminum-Alloy, Rivets and Cold-Heading Wire and Rods.*
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 221M-93 (1993), *Standard Specification for Aluminum-Alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Shapes and Tubes [Metric].*
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 8M-94b (1994b), *Standard Test Methods for Tension Testing of Materials [Metric].*
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. (1986). NBR 8800 - *Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios.* Rio de Janeiro.
- BRIDENBAUGH, P. R. (1987). *Aluminum / Aluminum Alloys.* FASM.
- BRIMELOW, E. I. (1971). *Aluminio en la Construcción.* Espanha. Ediciones URMO.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION, (1983). *Strength Design in Aluminum.* CAN3-S157-M83. Rexdale, Ontario. December.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION, (1984). *Cold Formed Steel Structural Members.* CAN3-S136-M84. . Rexdale, Ontario. December.
- CASTRO, L. A . (1997). *Análise da segurança no projeto de estruturas: método dos estados limites.* São Carlos, S.P. Dissertação (mestrado) - EESC/USP.
- CUNHA, L. J. G. da (1989). *Solda: como, quando e por quê.* - 2. ed. - D. C. Luzzatto Ed.
- KISSEL, J. R.; FERRY, R. L.(1995). *Aluminum Structures. A Guide to Their Specifications and Design.* New York, USA / Canada . John Wiley and Sons, Inc..

-
- MAGALHÃES, J. R. M.(1996). *Sobre o projeto e a construção de estruturas metálicas espaciais*. São Carlos, S.P. Dissertação (mestrado) - EESC/USP.
- MALITE, M. ; SALES, J. J.; GONÇALVES, R.M. (1993). *Sistemas estruturais: segurança nas estruturas*. São Carlos. Apostila / EESC-USP.
- MARSH, C. (1983). *Strength of Aluminum*. Canada. ALCAN Canada Products Limited.
- MASCARIN, A. E.; DIEFFENBACH, J.R. (1993) *Body in White Materials Systems: A Life Cycle Cost Compararison*. J. O. M., v.45, n.6, p. 16-19. June.
- MONTE, M. B. M. (1995) *Panorama do mercado mundial de alumínio: perspectivas e oportunidades para o metal e suas ligas*. Metalurgia e Materiais, julho/95.
- SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E.(1990) *Steel Structures: design and behaviour*. 3.ed. New York. Harper & Row.
- TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. (1961) *Theory of elastic stability*. New York. McGraw-Hill.