

1 AÇOS E PRODUTOS DE AÇO PARA ESTRUTURAS

1.1 Aços estruturais

O aço é uma liga metálica composta basicamente de ferro e de pequenas quantidades de carbono, que é o responsável por sua resistência. Na composição do aço também podem ser adicionados outros elementos para melhorar suas propriedades mecânicas, ou para fazê-lo adquirir propriedades especiais como, por exemplo, resistência a corrosão e resistência a temperaturas elevadas. Em função da composição química, é possível produzir diferentes tipos de aços estruturais com características diversas.

Aumentando o teor de carbono, aumenta-se a resistência do aço, porém reduzem-se a ductilidade e a soldabilidade. Os aços empregados na construção civil são os aços laminados a quente e que apresentam teor de carbono da ordem de 0,18% a 0,25%.

Uma das vantagens do uso do aço em estruturas é o fato de ser um material homogêneo com características mecânicas bem-definidas e de simples caracterização. Independentemente do tipo de aço, as seguintes propriedades físicas da Tabela 1.1 são constantes.

Tabela 1.1 Constantes físicas do aço.

Módulo de elasticidade	$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$
Módulo de elasticidade transversal	$G = 7700 \text{ kN/cm}^2$
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,3$
Coefficiente de dilatação térmica	$\beta_a = 1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Massa específica	$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$

Para o projeto e dimensionamento de elementos estruturais em aço é importante conhecer o diagrama *tensão versus deformação*, que pode ser obtido por meio de ensaio de tração em corpos de prova padronizados, em que se definem a resistência ao escoamento (f_y) e a resistência à ruptura (f_u). Diagramas tensão *versus* deformação típicos são apresentados na Figura 1.1.

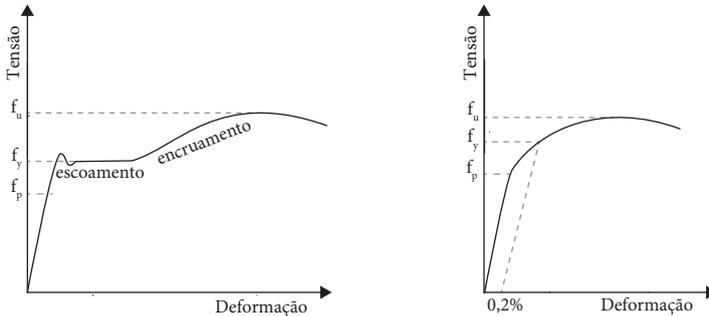


Figura 1.1 Diagrama tensão *versus* deformação.

No primeiro caso da Figura 1.1, tem-se um diagrama com patamar de escoamento definido, típico de aços virgens que não passaram por qualquer tipo de tratamento ou processos de transformação. No segundo caso, um diagrama tensão *versus* deformação sem patamar de escoamento definido, comum em aços que passaram por tratamento a frio como, por exemplo, o encruamento.

Para os procedimentos de dimensionamento, a NBR 8800:2008 exige aços estruturais com $f_y \leq 450$ MPa e relação $f_u/f_y \geq 1,18$. Os valores nominais da resistência ao escoamento f_y e resistência à ruptura f_u dos aços mais comumente utilizados, definidos pela norma americana da American Society for Testing and Materials (ASTM), são indicados na Tabela 1.2, esses aços atendem os requisitos da NBR 8800:2008.

Tabela 1.2 Valores nominais de resistência ao escoamento f_y e resistência à ruptura f_u de aços segundo especificação da ASTM.

Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Produto	Grupo ou faixa de espessura	Grau	Classificação	
ASTM A36	250	400 a 550	Perfis	1, 2 e 3	---	Aço-carbono	
			Chapas e barras	$t \leq 200$ mm			
ASTM A500	230	310	Perfis	4	A		
	290	400			B		
ASTM A572	290	415	Perfis	1, 2 e 3	42	Baixa liga e alta resistência mecânica	
	345	450			50		
	380	485			55		
	415	520	Chapas e barras	1 e 2	60		
	450	550			65		
	290	415	Chapas e barras	$t \leq 150$ mm	42		
	345	450			$t \leq 100$ mm		50
	380	485			$t \leq 50$ mm		55
	415	520			$t \leq 31,5$ mm		60
	450	550					65
ASTM A242	345	485	Perfis	1	–	Baixa liga e alta resistência mecânica e resistente à corrosão (patinável)	
	315	460		2	–		
	290	435		3	–		
	345	480	Chapa e barras	$t \leq 19$ mm	–		
	315	460		$19 \leq t \leq 37,5$ mm	–		
	290	435		$37,5 \leq t \leq 100$ mm	–		
ASTM A588	345	485	Perfis	1 e 2	–	Baixa liga e alta resistência mecânica e resistente à corrosão (patinável)	
	345	480	Chapas e barras	$t \leq 100$ mm	–		
	315	460		$100 \leq t \leq 125$ mm	–		
	290	435		$125 \leq t \leq 200$ mm	–		

Grupo 1 – perfis com espessura de mesa inferior ou igual a 37,5 mm

Grupo 2 – perfis com espessura de mesa superior a 37,5 mm e inferior ou igual a 50 mm

Grupo 3 – perfis com espessura de mesa superior a 50 mm

Grupo 4 – perfis tubulares

1.2 Perfis estruturais

As estruturas metálicas são formadas predominantemente por elementos lineares; as seções transversais destes elementos são denominadas comumente de perfis. A escolha da geometria do perfil depende do

tipo e intensidade das solicitações, do processo de montagem, dos detalhes de ligações, de fatores estéticos e de fatores ligados à durabilidade.

Os perfis estruturais podem ser classificados em três grupos em função do processo de obtenção/fabricação. São os perfis formados a frio, os perfis laminados (padrão americano e padrão europeu ou de abas paralelas) e os perfis soldados.

Os perfis formados a frio são obtidos por dobragem (conformação) de chapas planas em temperatura ambiente. Apresentam grande relação inércia-peso produzindo estruturas leves. Além disso, oferecem grande liberdade de forma e dimensões. No entanto, por serem fabricados com chapas de pequena espessura (de 1,5 mm a 6,3 mm), podem ser mais sensíveis à flambagem local e perda de seção por corrosão. São aplicados em estruturas de pequeno porte ou elementos secundários. Para a fabricação dos perfis formados a frio, devem-se respeitar as exigências e tolerâncias dimensionais da norma NBR 6355:2012. Já os critérios de dimensionamento deste tipo de perfil são estabelecidos pela NBR 14762:2013, e não fazem parte do escopo deste texto. Na Figura 1.2 apresentam-se as principais seções ou perfis formados a frio.

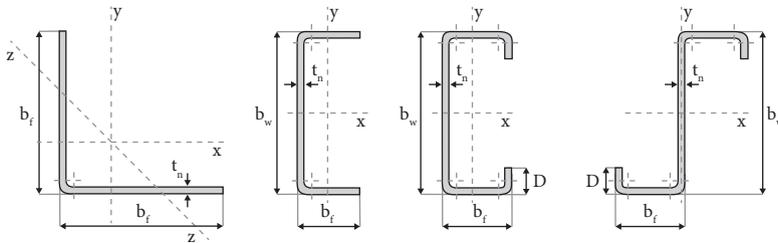
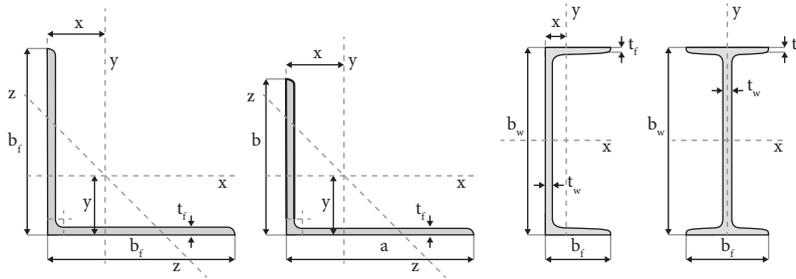
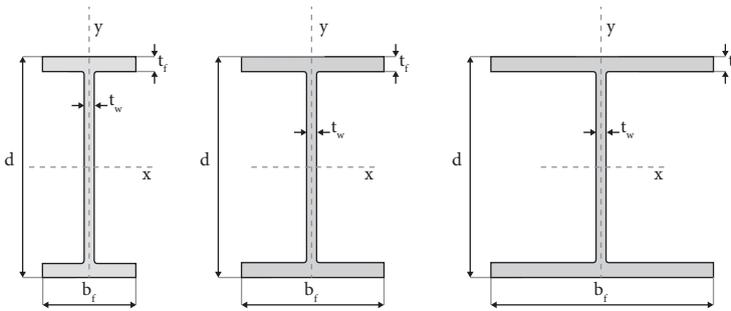


Figura 1.2 Perfis formados a frio.

Os perfis laminados do padrão americano apresentam baixa relação inércia-peso e pouca variedade de formas e dimensões; além disso, as espessuras variáveis dos elementos que compõem a seção (característica deste tipo de perfil) dificultam as ligações. Nos perfis laminados de abas planas, esses problemas são resolvidos, no entanto a oferta desses perfis no Brasil ainda é relativamente restrita (Figura 1.3). No Anexo deste livro, encontra-se um conjunto de tabelas de perfis laminados disponíveis no mercado brasileiro e em conformidade com a norma NBR 15980:2011, que estabelece as dimensões e tolerâncias dessa categoria de perfis estruturais.



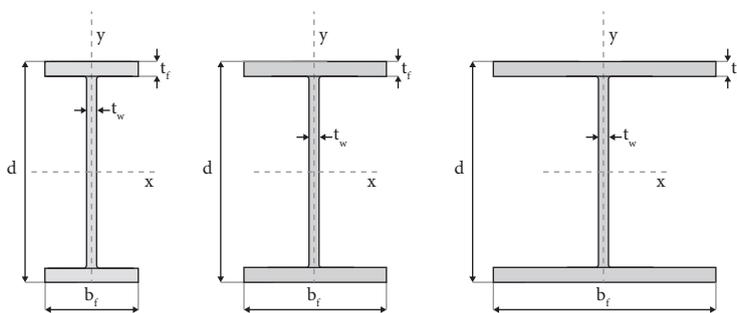
(a) Perfis laminados padrão americano



(b) Perfis laminados de abas planas

Figura 1.3 Perfis laminados mais comuns.

Os perfis soldados são obtidos pela soldagem de chapas planas, principalmente em seção em forma de I. O uso desses perfis se consolidou no Brasil em função da baixa oferta de perfis laminados de abas planas no mercado nacional, sobretudo para edifícios. Por ser fabricado a partir do corte e da solda de chapas planas, permite grande liberdade e variedade de dimensões. A norma NBR 5884:2013 estabelece as exigências e tolerâncias dimensionais para fabricação dos perfis soldados e apresenta três séries padronizadas, CS, VS e CVS, em função da relação entre altura e largura do perfil (Figura 1.4). As características geométricas dos perfis soldados padronizados pela norma NBR 5884:2013 encontram-se no Anexo deste livro.



Perfis soldados, VS, CVS e CS

Figura 1.4 Perfis soldados.

Outra possibilidade de seções que podem ser utilizadas nas estruturas de aço são os perfis tubulares. Os perfis tubulares podem ser circulares ou retangulares (Figura 1.5), obtidos por extrusão ou por calandragem. O processo de fabricação de tubos por calandragem, em que a seção resultante é denominada tubo com costura, permite a utilização de espessuras menores que as obtidas pelo processo de fabricação por extrusão (tubos sem costura).

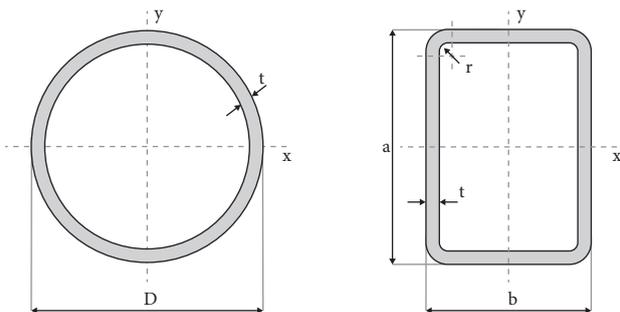


Figura 1.5 Seções tubulares: circular e retangular.

Devido às particularidades das estruturas constituídas predominantemente por seções tubulares, foi elaborada a norma NBR 16239:2013, que estabelece os requisitos para o projeto de edificações e ligações em estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto com seções tubulares.

1.3 Parafusos

Os parafusos aplicados nas ligações de estruturas de aço são produzidos a partir de aços estruturais. Na Tabela 1.3 são apresentados os tipos de parafusos mais utilizados em estruturas de aço com as respectivas resistência ao escoamento f_{yb} e resistência à ruptura f_{ub} segundo as especificações da ASTM e da International Organization for Standardization (ISO).

Tabela 1.3 Tipos de parafusos com resistência ao escoamento f_{yb} e resistência à ruptura f_{ub} .

Especificação	Resistência ao escoamento f_{yb} (MPa)	Resistência à ruptura f_{ub} (MPa)	Diâmetro d_b	
			Milímetro	Polegada
ASTM A307	-	415	-	$1/2 \leq d_b \leq 4$
ISO 898 Classe 4.6	235	400	$12 \leq d_b \leq 36$	
ASTM A325 ¹⁾	635	825	$16 \leq d_b \leq 24$	$1/2 \leq d_b \leq 1$
	560	725	$24 \leq d_b \leq 36$	$1 \leq d_b \leq 1 1/2$
ISO 7411 Classe 8.8	640	800	$12 \leq d_b \leq 36$	-
ASTM A490	895	1035	$16 \leq d_b \leq 36$	$1/2 \leq d_b \leq 1 1/2$
ISO 7411 Classe 10.9	900	1000	$12 \leq d_b \leq 36$	-

Nota:

¹⁾ Disponíveis também com resistência à corrosão atmosférica comparável à dos aços AR 350 COR ou à dos aços ASTM A588.

Na classe dos parafusos ISO, exemplificando para classe 8.8, o primeiro conjunto de dígito corresponde à resistência ao escoamento $f_y = 8 \times 100 \text{ N/mm}^2$ e o segundo, à relação $f_u/f_y = 0,8$. Mais detalhes e especificações sobre parafusos estruturais serão apresentados no capítulo 8.

1.4 Material de solda

Os processos de soldagem mais empregados na construção metálica envolvem a deposição de um outro metal na junta a ser soldada. Independentemente do processo de soldagem, o metal de solda deve apresentar propriedades mecânicas compatíveis com o metal base da estrutura. Na Tabela 1.4 são apresentadas as resistências mínimas à tração

dos metais de solda. Mais detalhes e especificações sobre processos, materiais e equipamentos de soldagem serão apresentados no capítulo 8.

Tabela 1.4 Resistência mínima à tração dos metais de solda.

Metal da solda	f_w (MPa)
Todos os eletrodos com classe de resistência 6 ou 60	415
Todos os eletrodos com classe de resistência 7 ou 70	485
Todos os eletrodos com classe de resistência 8 ou 80	550

1.5 Durabilidade das estruturas de aço

A durabilidade das estruturas de aço está fortemente ligada ao desenvolvimento de processos corrosivos. Além de sistema de proteção adequado, com pintura, galvanização ou uso de aços especiais com alta resistência à corrosão, é necessária atenção especial ao detalhamento, evitando pontos de acúmulo de umidade e poeira que podem acelerar a corrosão. Em Gnecco e Pannoni¹ encontram-se informações mais detalhadas sobre os processos de pintura e durabilidade das estruturas em aço.

A exposição a temperaturas elevadas, provocada pela ação do fogo em situação de incêndio, é outro fator que pode comprometer a durabilidade da estrutura ou até provocar o seu colapso. As propriedades físicas dos aços comuns decrescem rapidamente a partir de 400 °C de temperatura. Em situação de incêndio, a estrutura deve atender às exigências da NBR 14432:2001 e sua resistência deve ser verificada segundo a NBR 14323:2013. Para incrementar o desempenho da estrutura, em situação de incêndio podem ser utilizados sistemas de proteção como, por exemplo, pintura intumescente, revestimento dos perfis com argamassa refratária, revestimento dos perfis com concreto ou outros materiais isolantes. Para mais detalhes sobre o comportamento de estruturas em situação de incêndio, recomenda-se Vargas e Silva.²

1 Gnecco et al. (2006), Pannoni (2009).

2 Vargas e Silva (2005).