

1.1 Introdução

As primeiras obras de aço surgiram praticamente ao mesmo tempo em que se iniciou a produção industrial desse material. Existe registro da aplicação de aço na escadaria do museu do Louvre, em Paris por volta de 1780 e pouco tempo antes, em 1757, na Inglaterra, foi construída uma ponte em ferro fundido. Com o avanço no processo de fabricação do aço, por volta de 1880, já existia uma grande aplicação de aço na construção civil dos Estados Unidos. No Brasil, a primeira obra em estrutura metálica foi a ponte sobre o rio Paraíba do Sul, no estado do Rio de Janeiro, em 1857.

No Brasil não existem estatísticas específicas de percentual de tipo de estrutura por metro quadrado. Citando informações do Centro Brasileiro da Construção com Aço (CBCA), obtidas com base em levantamentos junto às fabricantes de estruturas metálicas, verifica-se que, enquanto nos Estados Unidos 50 % das edificações são construídas em aço e, no Reino Unido, em 70 % delas, no Brasil essa participação é de cerca de 15 %.

Os dados mais recentes apontam ainda que, de uma demanda total em 2008 superior a 2,8 milhões de toneladas para construção em aço, os principais destaques foram os aços planos revestidos, destinados a telhas, perfis steel framing e perfis drywall, que passaram de 502 mil toneladas em 2007, para 729 mil toneladas (+ 45,1 %) em 2008; e a demanda dos perfis e tubos para estruturas que cresceu de 284 mil toneladas para 411 mil toneladas (+ 44,7 %) no mesmo período.

1.2 Fabricação de Aços Estruturais

O aço é produzido, basicamente, a partir de minério de ferro, carvão e cal. A fabricação do aço pode ser dividida em quatro etapas: preparação da carga, redução, refino e laminação.

Preparação da carga

Grande parte do minério de ferro (finos) é aglomerada utilizando-se cal e finos de coque. O produto resultante é chamado de sinter. O carvão é processado na coqueria e transforma-se em coque.

Redução

Essas matérias-primas, agora preparadas, são carregadas no alto forno. Oxigênio aquecido a uma temperatura de 1000 °C é soprado pela parte de baixo do alto forno. O carvão, em contato com o oxigênio, produz calor que funde a carga metálica e dá início ao processo de redução do minério de ferro em um metal líquido: o ferro-gusa. O gusa é uma liga de ferro e carbono com um teor de carbono muito elevado.

Refino

Aciarias a oxigênio ou elétricas são utilizadas para transformar o gusa líquido ou sólido e a sucata de ferro e aço em aço líquido. Nessa etapa parte do carbono contido no gusa é removido juntamente com

impurezas. A maior parte do aço líquido é solidificada em equipamentos de lingotamento contínuo para produzir semiacabados, lingotes e blocos.

Laminação

Os semiacabados, lingotes e blocos são processados por equipamentos chamados laminadores e transformados em uma grande variedade de produtos siderúrgicos, cuja nomenclatura depende de sua forma e/ou composição química.

1.3 Requisitos para aços estruturais e materiais de ligação

1.3.1 Aços Estruturais

Os aços aprovados pela NBR 8800 para uso em perfis, barras e chapas devem ter qualificação estrutural assegurada por Norma Brasileira ou norma ou especificação estrangeira.

O aço a ser empregado na estrutura deve ter especificado para a sua superfície o grau de corrosão aceitável, entre os seguintes:

- substrato de aço sem corrosão, com carepa de laminação ainda intacta;
- substrato de aço com início de corrosão e destacamento da carepa de laminação;
- substrato de aço onde a carepa de laminação foi eliminada pela corrosão ou que possa ser removida por raspagem, com pouca formação de cavidades visíveis (pites);
- substrato de aço onde a carepa de laminação foi eliminada pela corrosão e com grande formação de cavidades visíveis (pites).

Para especificações mais detalhadas sobre aparência e acabamento de superfícies, deve ser consultada a ISO 8501-1.

Os valores base de resistência para aços estruturais são definidos para a tensão de escoamento (f_y) e para a tensão de ruptura (f_u). Por exigência normativa, os valores da tensão de escoamento para aços estruturais e da relação entre as tensões última e de escoamento deve atender ao seguinte:

$$f_y \leq 450 \text{ MPa} \quad (1.1)$$

$$\frac{f_u}{f_y} \geq 1,18 \quad (1.2)$$

Não são relacionados os aços com resistência ao escoamento inferior a 250 MPa, por não estarem sendo utilizados na prática. Nos aços da ABNT NBR 7007, que são aços para perfis, a sigla MR significa média resistência mecânica, a sigla AR alta resistência mecânica e a sigla COR resistência à corrosão atmosférica.

1.3.2 Materiais de ligação

Parafusos

Os parafusos de aço de baixo teor de carbono devem satisfazer a ASTM A307 ou a ISO 898-1 Classe 4.6. Os parafusos de alta resistência devem satisfazer a ASTM A325 ou a ISO 4016 Classe 8.8. Os parafusos de aço-liga temperado e revenido devem satisfazer a ASTM A490 ou a ISO 4016 Classe 10.9. As porcas e arruelas devem satisfazer as especificações compatíveis, citadas no ANSI/AISC 360.

Eletrodos

Os eletrodos, arames e fluxos para soldagem devem obedecer às seguintes especificações:

- eletrodos de aço doce, revestidos, para soldagem por arco elétrico: AWS A5.1;
- eletrodos de aço de baixa liga, revestidos, para soldagem por arco elétrico: AWS A5.5;
- eletrodos nus de aço doce e fluxo, para soldagem por arco submerso: AWS A5.17;
- eletrodos de aço doce, para soldagem por arco elétrico com proteção gasosa: AWS A5.18;
- eletrodos de aço doce, para soldagem por arco com fluxo no núcleo: AWS A5.20;

- f) eletrodos nus de aço de baixa liga e fluxo, para soldagem por arco submerso: AWS A5.23;
- g) eletrodos de baixa liga, para soldagem por arco elétrico com proteção gasosa: AWS A5.28;
- h) eletrodos de baixa liga, para soldagem por arco com fluxo no núcleo: AWS A5.29.

1.4 Produtos Siderúrgicos e Nomenclatura

Os aços estruturais são fornecidos em forma de perfis, chapas, barras, fios e cordoalhas. Sendo que os elementos estruturais das estruturas metálicas são constituídos primordialmente por perfis metálicos. Abaixo estão colocadas as principais características e sua nomenclatura em linhas gerais.

1.4.1 Barras

As barras são produtos obtidos por laminação nas seções: circular, quadrada ou retangular alongada (chamada "chata"). As barras são referidas pelo seu diâmetro ou pelas dimensões de sua seção transversal no caso das barras chatas.

Nomenclatura

- $\Phi 25$ - indica barra com diâmetro 25 mm.
- 127 x 6,4 - indica barra chata com seção 127 mm por 6,4 mm ($5" \times \frac{1}{4}"$)

1.4.2 Chapas

As chapas também são elementos laminados com espessuras variadas e resistências variadas. As chapas finas são as que têm espessuras de até 5,0 mm, acima desse valor estão as chapas grossas. A nomenclatura das chapas é feita em função da espessura ou de sua resistência.

Nomenclatura

- CH 8, indica chapa com 8,0 mm de espessura;
- CG-26, aços comuns, chapa grossa com $f_y=255$ MPa e $f_u=410$ MPa;
- CF-26, aços comuns, chapa fina com $f_y=260$ MPa e $f_u=400$ MPa;
- G-35, aços de baixa liga e alta resistência mecânica, chapa grossa, $f_y=345$ MPa e $f_u=450$ MPa;
- F-35, aços de baixa liga e alta resistência mecânica, chapa fina, $f_y=340$ MPa e $f_u=450$ MPa.

1.4.3 Perfis Laminados

Existem inúmeros produtos laminados, fabricados em padrões americanos (série americana, perfis de faces, em geral, não paralelas) e padrões europeus (série europeia, de faces paralelas) obtidos por laminação. Como regra geral, sempre é necessário trabalhar com a tabela do fornecedor para obter as propriedades do perfil.

Os laminadores produzem perfis de grande eficiência estrutural, em forma de H, I, C, L, os quais são denominados correntemente perfis laminados. Os tubos são produtos ocos, de seção circular, retangular ou quadrada. Os trilhos são produtos laminados destinados a servir de apoio para as rodas metálicas de pontes rolantes ou trens. A seção do trilho ferroviário apresenta uma base de apoio, uma alma vertical e um boleto sobre o qual se apoia a roda.

A nomenclatura dos perfis I ou S, H, C ou U segue certa regra, onde é fornecida a indicação da forma do perfil seguida de sua altura total (d, em mm) e de sua massa linear (kg/m). Por vezes, a referência à altura do perfil e à sua massa linear é arredondada nos nomes de perfis das tabelas, de modo que deve-se consultar os valores exatos nas próprias tabelas. Existem diversos complementos possíveis e algumas nomenclaturas alternativas, como W, HP, HPP. Os perfis cantoneira, L, podem seguir a mesma regra anterior, porém é mais comum utilizar nomenclatura própria, assim como os trilhos. Tubulares são definidos pelo diâmetro ou dimensões dos lados.

Nomenclatura

- H 102x20,5 - perfil H (I com lados iguais), com $d = 101,6$ mm e massa linear 20,5 kg/m. Note que na nomenclatura o h é arredondado;
- I 127 x 22,0 - perfil I, com $d = 127,0$ mm e massa linear 22,0 kg/m;
- U 203 x 20,5 - perfil U ou C (Channel), com $d = 203,2$ mm e massa linear 20,5 kg/m;
- W 250x38,5 - perfil tipo I, com $d = 262$ mm e massa linear 38,5 kg/m. Note que na nomenclatura o d é bem diferente da sigla, mas faz parte da mesma categoria de perfis W 250xXX;
- HP 310x110 - perfil tipo I, com $d = 308,0$ mm e massa linear 110,0 kg/m;
- L 102 x 6,4 - cantoneira de abas iguais com lado 102,0 mm e espessura 6,4 mm;
- L 89 x 64 X 6,4 - cantoneira de abas desiguais, com lados 89,0 e 64,0 mm, e espessura 6,4 mm;
- TR-50 - trilho ferroviário tipo americano AREA 100RE com massa linear 50,0 kg/m.

1.4.4 Perfis Soldados

Perfis soldados são montados através da união de chapas usando soldas, formando seções transversais I, C (ou U), H, tubulares e caixão. No caso de perfis soldados, a regra geral de nomenclatura é praticamente a mesma dos perfis laminados.

Nomenclatura

- VS - viga soldada com relação $2,0 \leq d/b_f \leq 4,0$, em geral $d/b_f \cong 2,0$. VS 500x97, $d = 500$ mm e massa linear 97,4 kg/m;
- CVS - coluna ou viga soldada com relação $1,0 \leq d/b_f \leq 1,5$, em geral $d/b_f \cong 1,5$. CVS 450x116, $d = 450$ mm e massa linear 116,4 kg/m;
- CS - coluna soldada com relação $d/b_f \cong 1,0$. CS 250x52, $d = 250$ mm e massa linear 51,8 kg/m;

1.4.5 Perfis Dobrados

As chapas metálicas de aços dúcteis podem ser dobradas a frio, transformando-se em perfis de chapas dobradas. A dobragem das chapas é feita em prensas especiais nas quais há gabaritos que limitam os raios internos de dobragem a certos valores mínimos, especificados para impedir a fissuração do aço na dobra.

O uso de chapas finas (em geral menos que 3 mm de espessura) na fabricação desses perfis conduz a problemas de instabilidade estrutural não existentes em perfis laminados. Há uma grande variedade de perfis que podem ser fabricados, muitos com apenas um eixo de simetria ou nenhum, alguns simples, outros mais complexos.

Normas de projeto específicas para esse tipo de perfil metálico foram desenvolvidas, como a do American Iron and Steel Institute (AISI) e a norma brasileira NBR 14762, Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas de Perfis Formados a Frio.

1.5 Características do Material Aço

A aplicação de um ou de outro material no sistema estrutural é precedida por uma avaliação das características de cada sistema, optando pelo mais adequado à situação considerada. Podem ser citadas algumas vantagens e desvantagens gerais do uso do material aço em construções civis.

Vantagens

- Alta resistência do material, que possibilita a execução de estruturas comparativamente leves;
- Processo de fabricação garante dimensões e propriedades homogêneas para o material e para as peças fabricadas;
- Por tratar-se de estrutura com características de pré-fabricação, a sua aplicação em campo é rápida e limpa. Possibilidade de reduções em cronogramas;

- Flexibilidade de aplicação em situações especiais, tais como: reformas, reforços, canteiros exíguos ou estruturas temporárias;

Desvantagens

- Necessidade de tratamento e cuidados especiais contra corrosão;
- Sensibilidade estrutural em caso de incêndio;
- Por tratar-se, em geral, de estruturas esbeltas, é importante considerar a possibilidade de vibrações indesejáveis na estrutura;
- Necessidade de mão de obra mais especializada e equipamentos para serviços de montagem e solda;
- Por tratar-se de estrutura com características de pré-fabricação, o projeto necessita adaptar-se à disponibilidade do fornecimento e não o contrário.

1.5.1 Propriedades Mecânicas de Projeto

Para efeito de cálculo devem ser adotados, para os aços aqui relacionados, os seguintes valores de propriedades mecânicas:

- módulo de elasticidade, $E = 200000 \text{ MPa}$;
- coeficiente de Poisson, $\nu = 0,3$;
- módulo de elasticidade transversal, $G = 77000 \text{ MPa}$;
- coeficiente de dilatação térmica, $\beta = 1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- massa específica, $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$.

O diagrama tensão deformação do aço é ilustrado na figura 1.1. No diagrama, f_u é a resistência de ruptura do aço à tração ou limite de resistência à tração, f_y a resistência ao escoamento do aço à tensão normal ou limite de escoamento e f_p o limite de proporcionalidade.

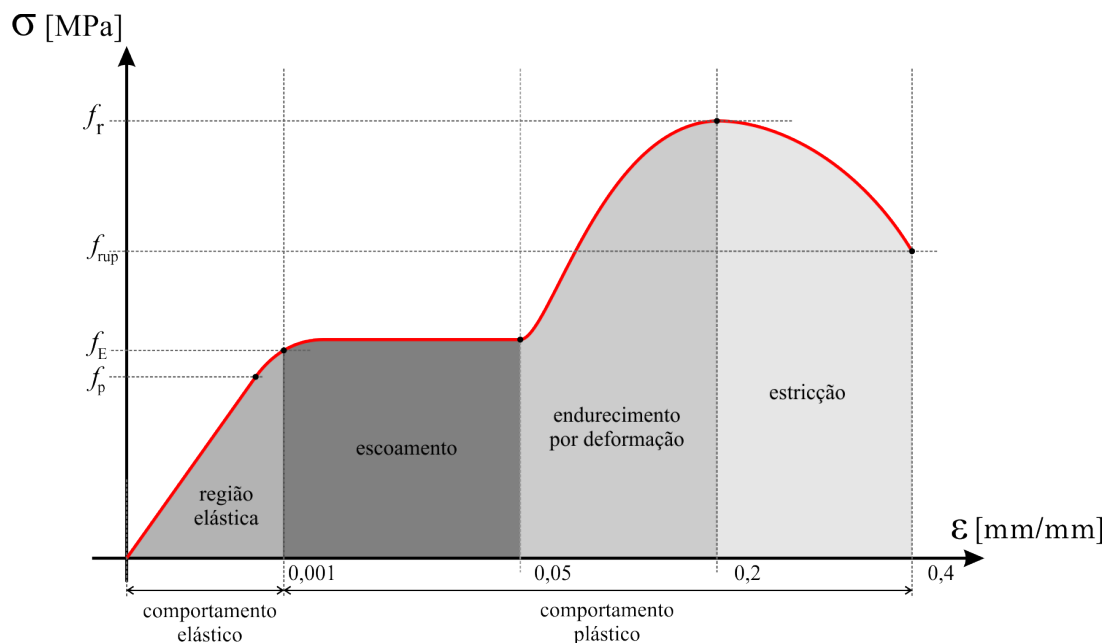


Figura 1.1: Diagrama tensão x deformação do aço na tração.

1.5.2 Ductilidade

Denomina-se ductilidade a capacidade de o material apresentar grandes deformações (plásticas na maioria das vezes), sem romper, sob a ação de cargas normalmente elevadas. Os aços dúcteis, quando sujeitos a tensões locais elevadas sofrem deformações plásticas capazes de redistribuir as tensões. Esse comportamento plástico permite, por exemplo, que se considere numa ligação parafusada a distribuição uniforme da carga entre parafusos. Além desse efeito local, a ductilidade tem importância porque conduz a mecanismos de ruptura acompanhados de grandes deformações que fornecem avisos da atuação de cargas elevadas.

1.5.3 Fragilidade

É o oposto da ductilidade. Os aços podem se tornar frágeis pela ação de diversos agentes: baixas temperaturas ambientes, efeitos térmicos locais causados, por exemplo, por solda elétrica, fogo, entre outros.

1.5.4 Resiliência

Resiliência é a capacidade de absorver energia mecânica em regime elástico, ou, o que é equivalente, a capacidade de restituir energia mecânica absorvida. Denomina-se módulo de resiliência ou simplesmente resiliência a quantidade de energia elástica que pode ser absorvida por unidade de volume do metal tracionado. Ela é igual a área do diagrama $\sigma \times \varepsilon$ até o limite de proporcionalidade.

1.5.5 Tenacidade

Tenacidade é a energia total, elástica e plástica que o material pode absorver por unidade de volume até a sua ruptura. Em tração simples, a tenacidade é representada pela área total do diagrama $\sigma \times \varepsilon$.

1.5.6 Dureza

Denomina-se dureza a resistência ao risco ou abrasão. Na prática mede-se dureza pela resistência que a superfície do material oferece à penetração de uma peça de maior dureza.

1.5.7 Fadiga

Quando as peças metálicas trabalham sob efeito de esforços repetidos em grande número, pode haver ruptura em tensões inferiores às obtidas em ensaios estáticos. Esse efeito denomina-se fadiga do material.

1.5.8 Temperatura

As temperaturas elevadas reduzem as resistências ao escoamento (f_y) e ruptura (f_u), bem como o módulo de elasticidade E . Após 100 °C, os aços tendem a perder o limite de escoamento bem definido, tornando o diagrama arredondado. Em temperaturas mais elevadas, acima de 250 °C começa a ocorrer a fluência nos aços.

1.5.9 Corrosão

Denomina-se corrosão o processo de reação do aço com alguns elementos presentes no ambiente em que se encontra exposto, sendo o produto dessa reação muito similar ao minério de ferro. A corrosão promove a perda de seção das peças de aço, podendo se constituir em causa de colapso.

Algumas providências adotadas no projeto contribuem para o aumento da vida útil das estruturas de aço expostas ao ar, tais como evitar pontos de umidade e sujeira, promover a drenagem e aeração e evitar pontos inacessíveis à manutenção e pintura. Deve-se também evitar o contato entre metais diferentes (por exemplo, aço e alumínio), intercalando entre eles um isolante elétrico.

1.6 Valores Base de Resistências

Os valores base de resistência são definidos por norma e são apresentados a seguir de acordo com especificações da norma brasileira NBR 8800 e da norma Norte Americana ASTM A6 para aços estruturais. Esses valores devem ser utilizados como referência para projeto e dimensionamento.

1.6.1 Aços Estruturais

As especificações dos aços para uso estrutural são as seguintes:

- ▷ Aços especificados por Normas Brasileiras para uso estrutural
 - Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral

Denominação	f_y [MPa]	f_u [MPa]
MR 250	250	400 (usual) a 560
AR 350	350	450
AR 350 COR	350	485
AR 415	415	520

– Chapas grossas de aço-carbono para uso estrutural

Denominação	f_y [MPa]	f_u [MPa]
CG-26	255	410
CG-28	275	440

– Chapas finas moldadas a frio (F) ou a quente (Q) de aço-carbono para uso estrutural

Denominação	f_y [MPa]	f_u [MPa]
CF-26	260 (F e Q)	400 (F) e 410 (Q)
CF-28	280 (F e Q)	440 (F e Q)
CF-30	300 (Q)	490 (Q)

– Chapas grossas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica

Denominação	f_y [MPa]	f_u [MPa]
G-30	300	415
G-35	345	450
G-42	415	520
G-45	450	550

– Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica

Denominação	f_y [MPa]	f_u [MPa]
F-32/Q-32	310	410
F-35/Q-35	340	450
Q-40	380	480
Q-42	410	520
Q-45	450	550

– Chapas grossas e bobinas grossas, de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural

Denominação	f_y [MPa]	f_u [MPa]
CGR 400	250	380
CGR 500 e 500a	370	490

– Chapas finas e bobinas finas moldadas a frio (F) ou a quente (Q), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural

Denominação	f_y [MPa]	f_u [MPa]
CFR 400	250 (Q)	380 (Q)
CFR 500	310 (F) e 370 (Q)	450 (F) e 490 (Q)

– Perfil tubular, de aço-carbono, formado a frio, com e sem costura, de seção circular(circ.), retangular (ret.) ou quadrada (quad.) para usos estruturais

Denominação	f_y [MPa]	f_u [MPa]
B (circ.)	290	400
C (circ.)	317	427
B (ret./quad.)	317	400
C (ret./quad.)	345	427

▷ Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural

– Aços-carbono para uso em perfis (P), chapas (C) e barras (B) redondas, quadradas e chatas

Denominação	f_y [MPa]	f_u [MPa]
A36 (P, C e B)	290	400
A500 (P)	317	427

- Aços de baixa liga e alta resistência mecânica para uso em perfis (P), chapas (C) e barras (B) redondas, quadradas e chatas

Denominação	f_y [MPa]	f_u [MPa]
A572 (P, C e B)	290, 345, 380, 415, 450	415, 450, 485, 520, 550
A992 (P)	345 a 450	450

- Aços de baixa liga e alta resistência mecânica resistentes à corrosão atmosférica para uso em perfis (P), chapas (C) e barras (B) redondas, quadradas e chatas

Denominação	f_y [MPa]	f_u [MPa]
A242 (P, C e B)	290, 315, 345	435, 460, 485
A588 (P, C e B)	290, 315, 345	435, 460, 480 a 485

- Aços de baixa liga temperados e auto-revenidos¹ para uso em perfis

Denominação	f_y [MPa]	f_u [MPa]
A913	345, 415, 450	450, 520, 550

1.6.2 Parafusos

Na sequência são fornecidos os valores mínimos da resistência ao escoamento (f_{yb}) e da resistência à ruptura (f_{ub}) de parafusos, de acordo com suas respectivas normas ou especificações, bem como os diâmetros nos quais os mesmos podem ser encontrados. Os parafusos fabricados com aço temperado não podem ser soldados nem aquecidos.

Denominação	f_{yb} [MPa]	f_{ub} [MPa]	Diâmetro [mm]
ASTM A307	-	415	$12,7 \leq d_b \leq 101,6$
ISO 898-1 Classe 4.6	235	400	$12 \leq d_b \leq 36$
ASTM A325	635 560	825 725	$16 \leq d_b \leq 24$ $24 \leq d_b \leq 36$
ISO 4016 Classe 8.8	640	800	$12 \leq d_b \leq 36$
ASTM A490	895	1035	$16 \leq d_b \leq 36$
ISO 4016 Classe 10.9	900	1000	$12 \leq d_b \leq 36$

1.6.3 Eletrodos

A resistência mínima à tração dos metais de soldas usuais, conforme as normas ou especificações das soldas é mostrada a seguir.

Metal da Solda	f_w [MPa]
classe de resistência 6 ou 60	415
classe de resistência 7 ou 70	485
classe de resistência 8 ou 80	550

¹Em aços com camadas superficiais endurecidas espessas (4 a 6mm), o calor residual presente no núcleo, depois do resfriamento, pode ser suficiente para aliviar as tensões de têmpera, tornando desnecessário o revenimento. Este procedimento é conhecido como autorevenimento.