

Capítulo 2

Aços e ferros fundidos

2.1 Obtenção dos aços e do ferro fundido

O minério de ferro é encontrado na natureza geralmente a céu aberto (figura 2.1), sob a forma de óxidos, como a magnetita (Fe_3O_4) e a hematita (Fe_2O_3), e também sob a forma de carbonatos, sulfetos e silicatos.

Figura 2.1
Mina de exploração de minério de ferro de Carajás, no Pará.



Na extração desses minérios deve-se levar em consideração a importância de projetos que garantam a vida e o respeito às pessoas e ao meio ambiente.

Os aços e o ferro fundido são fabricados em siderúrgicas. A matéria-prima deve ser preparada para se adequar ao processo de fabricação. Para tanto temos dois modelos de usinas siderúrgicas:

- integradas;
- mini-mills.

2.1.1 Usinas integradas

Nestas usinas integradas acontecem as principais etapas da fabricação dos aços e ferros fundidos. O alto-forno é um forno especial no qual ocorre a extração do ferro do seu minério (óxidos) (figura 2.2). O alto-forno consiste em um reator tubular vertical, no qual a redução se dá de maneira praticamente contínua. Na parte superior é alimentado com carga sólida e, na inferior, com ar preaquecido.

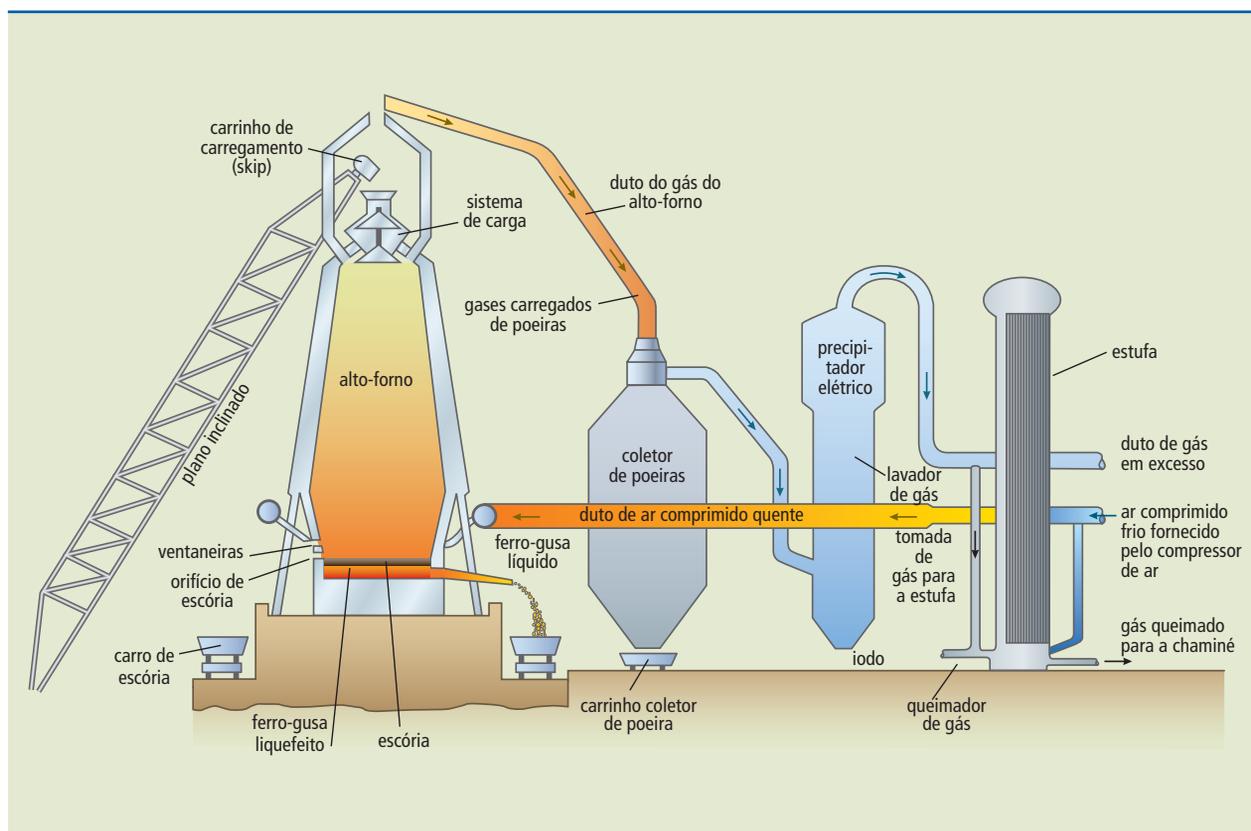


Figura 2.2

Esquema representativo de um alto-forno.

Um alto-forno típico tem cerca de 30 metros de altura e 7 metros de diâmetro e apresenta uma pequena variação do diâmetro interno, necessária para compensar a variação de volume dos gases em função da temperatura. Possui um coletor de poeira cuja função é recolher a grande quantidade de poeiras carregadas nos gases. Há lavadores que empregam um precipitador eletrostático, o qual permite a geração de um campo elétrico que ioniza as partículas de pó, atraindo-as para as paredes do aparelho. Em seguida, são levadas ao fundo com o uso de água e regeneradores. Os regeneradores são armazenadores de calor, constituídos por uma câmara de combustão em que o gás do alto-forno é queimado com ar.

Quimicamente, ocorre o fenômeno da reação da liga ferro-carbono com o carvão ou coque. Esse fenômeno é chamado redução. A liga tem basicamente 5% de carbono. O produto final dessa reação é conhecido como ferro-gusa, que agora está no estado líquido e pode ser vazado em fornos apropriados.

A laminação é tratada no livro: Métodos e processos industriais.

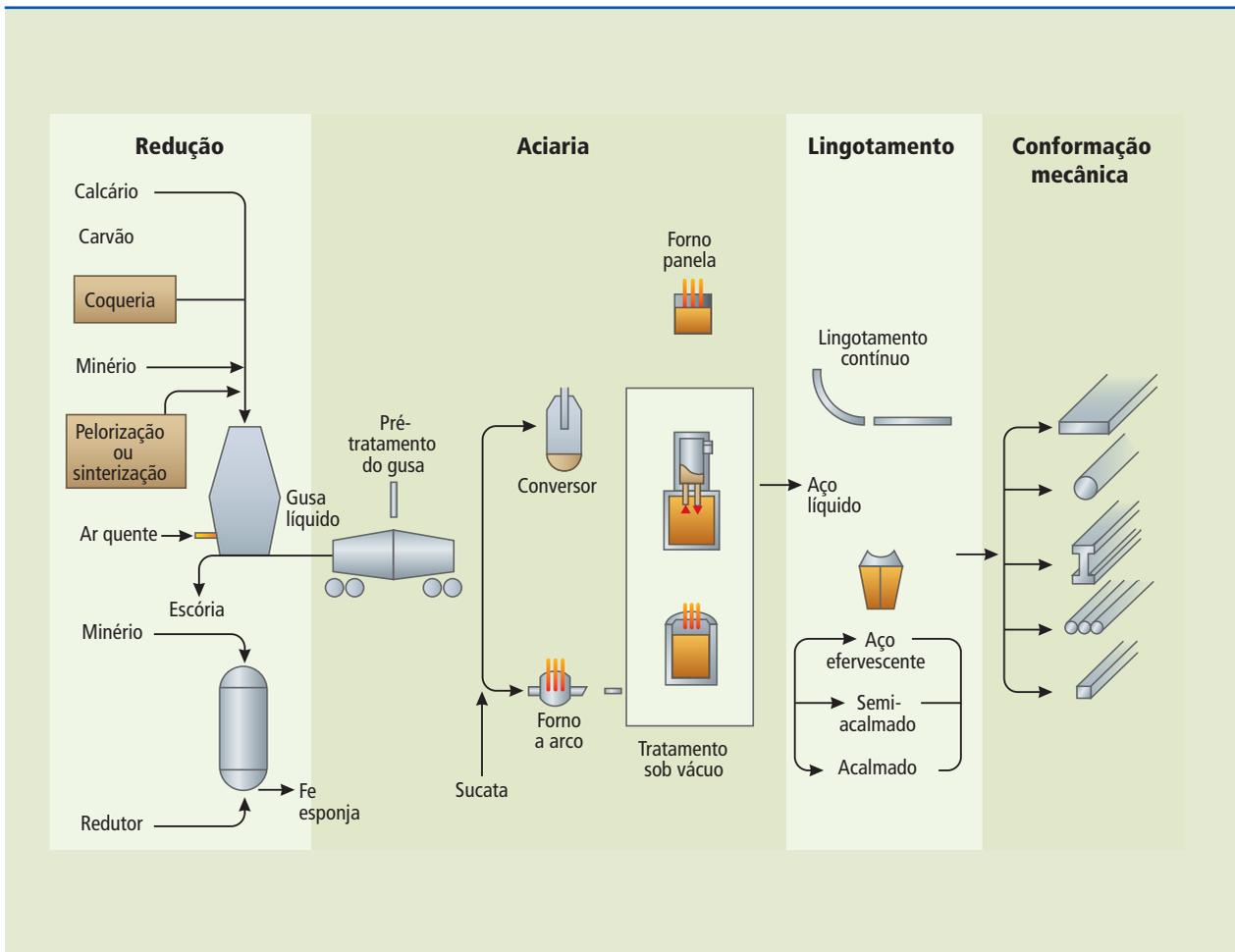
Por fim, há o aço na forma de lingotes. Uma vez no estado sólido, o aço está pronto para a transformação mecânica, que pode ser feita por intermédio de **laminadores**, resultando em blocos, tarugos e placas.

A figura 2.3 apresenta um esquema das principais etapas de fabricação do aço, com base no modelo de processos adotados pelas usinas integradas.

O ferro líquido produzido é rico em carbono e contém impurezas indesejadas. Essa combinação resulta em um produto com propriedades limitadas. O aço, então, passa por processos de refinação. A combinação de um processo de redução de minérios levou ao modelo atual de usina siderúrgica apresentado no esquema da figura 2.3.

Figura 2.3

Fluxograma de produção do aço com as diversas alternativas de processo.



2.1.2 Matéria-prima

As matérias-primas básicas das usinas integradas são:

- minério de ferro;
- carvão;
- calcário.

Minério de ferro

A matéria-prima principal para a manufatura dos processos siderúrgicos é o minério de ferro, e os minerais que contêm ferro em quantidade apreciável são os óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Os principais óxidos encontrados na natureza são:

- **magnetita** (óxido ferroso-férrico) de fórmula Fe_3O_4 , contendo 72,4% de Fe;
- **hematita** (óxido férrico), de fórmula Fe_2O_3 , contendo 69,9% de Fe;
- **limonita** (óxido hidratado de ferro), de fórmula $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NH}_2\text{O}$, contendo, em média, 48,3% de Fe.

Antes de ser inserido no alto-forno, o minério de ferro sofre processos de beneficiamento, com o objetivo de alterar suas características físicas e químicas e torná-lo adequado para utilização. Esses processos são: britamento, peneiramento, mistura, moagem, classificação e aglomeração.

Um dos processos mais importantes dessa etapa é a aglomeração. Tem por objetivo melhorar a permeabilidade da carga do alto-forno para minimizar os custos com a compra de carvão, pois a quantidade exigida é menor. Realizada a aglomeração, a redução apresenta melhorias e o processo se torna mais rápido.

Industrialmente, esse processo é classificado como pelotização, na qual a aglomeração é realizada com partículas ultrafinas de minério de ferro. E a sinterização, que consiste, basicamente, na adesão das partículas, faz com que os pontos de contato aumentem com a temperatura, mantendo o volume e alterando fisicamente a forma cristalina, isto é, enchendo os espaços vazios.

Carvão

O carvão utilizado nos altos-fornos pode ser de origem tanto mineral quanto vegetal. Possui várias funções dentro do processo, que são:

- atuar como combustível, gerando calor para as reações;
- atuar como redutor do minério, que é basicamente constituído de óxidos de ferro;
- atuar como fornecedor de carbono, que é o principal elemento de liga dos produtos siderúrgicos.

Da mesma forma que o minério, o carvão também sofre processamento antes de ser introduzido no alto-forno. Essa operação consiste na coqueificação, que é o aquecimento do carvão mineral a altas temperaturas, em câmaras hermeticamente fechadas, portanto com ausência total de ar, exceto na saída dos produtos voláteis.

Calcário

O calcário reage com substâncias estranhas ou impurezas contidas no minério e no carvão, diminuindo seu ponto de fusão e formando a escória, subproduto do processo clássico do alto-forno.



Figura 2.4

Escória, subproduto do processo do alto-forno.



2.1.3 Operações siderúrgicas

Produção do ferro-gusa

O alto-forno pode ser dividido em três partes fundamentais: o fundo, também conhecido como cadinho, a parte do meio, conhecida como rampa, e a cuba, que é a parte superior.

Figura 2.5

O **cadinho** é onde o ferro-gusa é depositado. Como a escória (impurezas que se formam durante o processo) deve ser separada do ferro, nesta etapa ocorre esta separação. A escória é menos densa que o ferro e flutua no cadinho, no qual existem dois furos: o furo superior para escoamento da escória e o furo inferior, que é aberto quando se deseja que o ferro líquido escoe.

A fusão e a combustão ocorrem na **rampa**. Existem furos distribuídos uniformemente entre o cadinho e a rampa chamados de ventaneiras, por onde o ar pré-aquecido é soprado sob pressão, o que serve para facilitar os processos entre o cadinho e a rampa.

A **cuba** é a parte maior do alto-forno: ela representa dois terços da altura total. Nela é colocada a carga, composta de minério de ferro (sínter ou pelotas), carvão na forma de coque ou vegetal e os fundentes (cal e calcário).

À medida que o carvão, o minério e o calcário descem, encontram os gases provenientes da queima do coque com o oxigênio soprado pelas ventaneiras, a uma temperatura de aproximadamente 1 000° C.

Nesse contexto, o coque, por causa da alta temperatura, reage quimicamente com todo o material líquido e pode, então, ocupar os interstícios (vazios). O processo agora tem dois produtos líquidos: a escória e o ferro-gusa.

O ferro-gusa é uma liga ferro-carbono com teores elevados de carbono (3,4% a 4,5%) e grande quantidade de impurezas. Ele é utilizado para a fabricação do aço e do ferro fundido.

O ferro-gusa pode ser utilizado em contrapesos de guindastes e peças de baixa responsabilidade, em geral sua maior utilização é como matéria-prima de outros produtos siderúrgicos.

Fabricação do aço

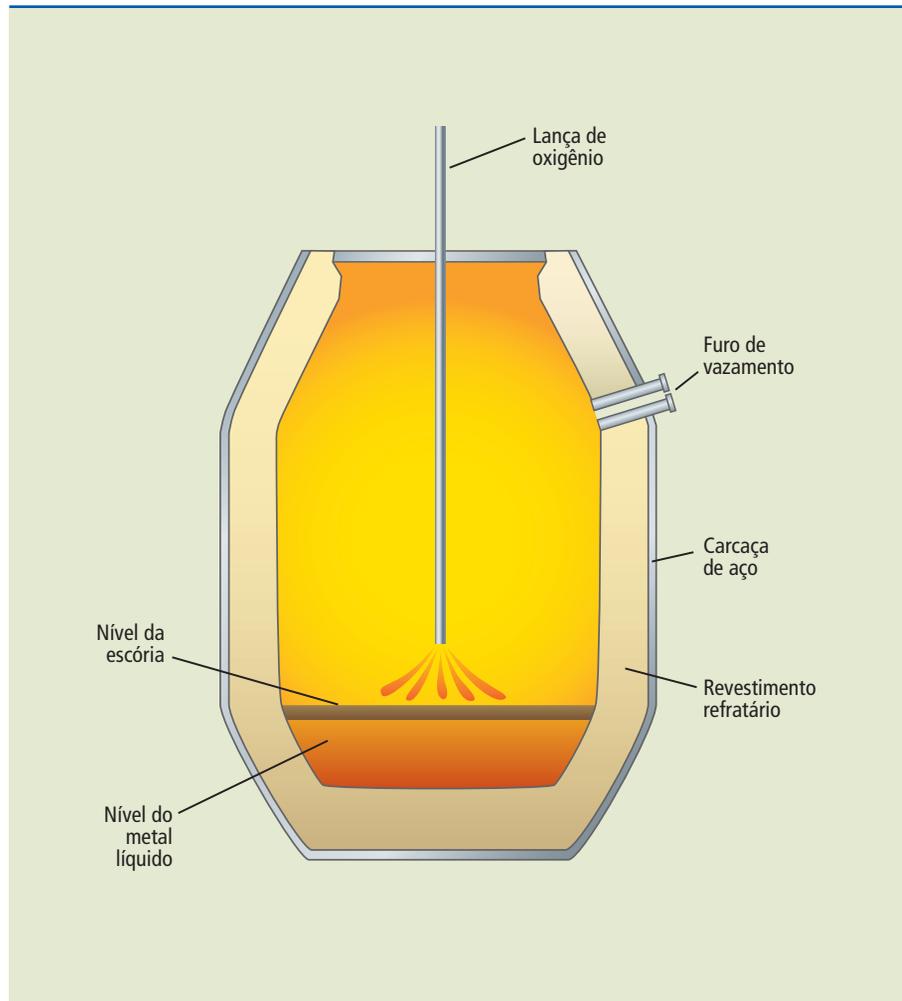
O aço é uma liga de ferro com baixos teores de carbono (C) e, como o ferro-gusa, durante a sua fabricação apresenta teores elevados de carbono e impurezas, silício (Si), manganês (Mn), fósforo (P) e enxofre (S). A transformação do ferro-gusa em aço ocorre pela redução da porcentagem de carbono e das impurezas, por um processo de oxidação. Na usina siderúrgica, o processo de redução acontece no setor chamado aciaria, utilizando um equipamento conhecido como conversor para obtenção do aço. Existem vários modelos de aciarias e conversores, os mais conhecidos são:

- Bessemer/Thomas, de sopro de oxigênio pelo fundo;
- Tropenas, de sopro de oxigênio pela lateral;
- Linz-Donawitz (LD), de sopro de oxigênio pela parte superior.

No Brasil se utiliza um conversor constituído de uma carcaça cilíndrica de aço, revestida com materiais refratários, conhecido como LD ou BOP (basic oxygen process), conforme a figura 2.6.

Figura 2.6

Seção transversal esquemática de um conversor utilizando insuflação de oxigênio pelo topo.



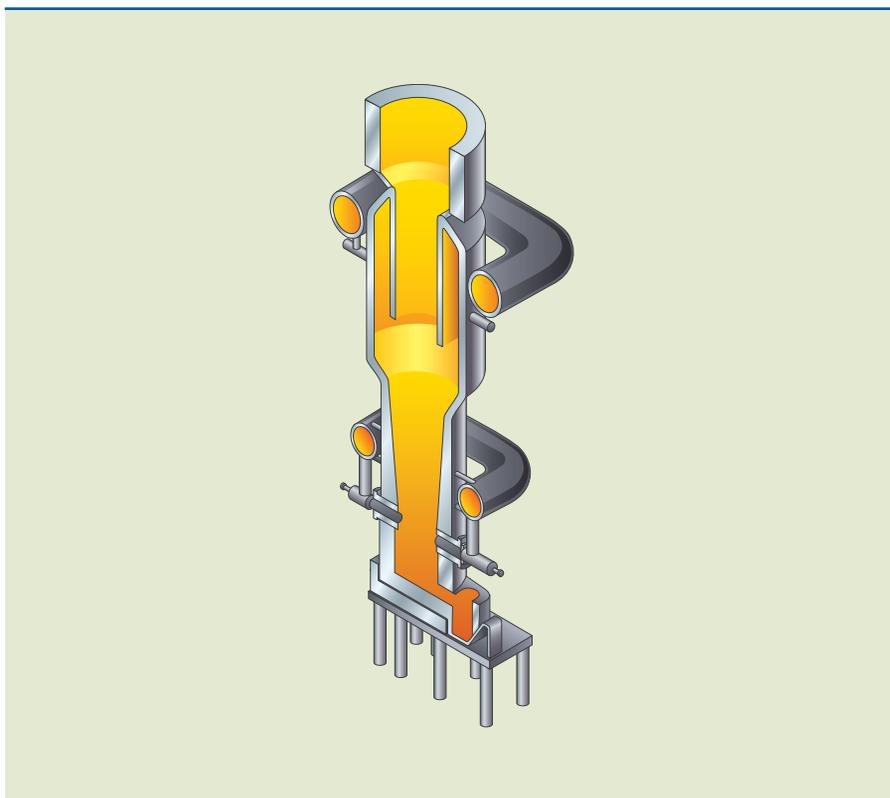
Neste conversor, o oxigênio é soprado praticamente puro por meio de uma lança, provocando um choque na superfície líquida. O forno é carregado com gusa líquido e sucata, o sopro provoca a oxidação para a redução do carbono e das impurezas, e é controlado por cálculos, de acordo com os teores de carbono a serem alcançados. Por fim, a lança é retirada e o forno é basculado para o processo de vazamento do aço.

Fabricação do ferro fundido

O ferro fundido apresenta teores de carbono maiores que o aço, os quais são obtidos no forno cubilô, que também utiliza como matéria-prima o ferro-gusa e sucatas. A figura 2.7 evidencia em corte o forno vertical e cilíndrico.

Na parte superior existe uma abertura por onde é feita a carga de ferro-gusa, sucatas de aço e ferro fundido, carvão coque e calcário, materiais que são colocados alternadamente.

Uma bica no fundo do forno escoo o metal fundido em intervalos determinados, a escória, que é mais leve, é retirada por uma abertura acima.

**Figura 2.7**

Forno cubilô.

2.1.4 Usinas mini-mills

Matéria-prima

Estas usinas utilizam como matéria-prima para o processo de fabricação do aço sucata (de aço ou ferro fundido) e cal, e pode-se utilizar também o ferro-gusa.

Pode-se trabalhar também com o ferro-gusa proveniente das usinas integradas.

Operações siderúrgicas

As mini-mills são equipadas principalmente com fornos elétricos a arco ou por indução que podem fundir sucata metálica e produzir aço conforme as especificações exigidas. Após carregar o forno com uma mistura preajustada de matéria-prima (por exemplo, sucata metálica, ferro-gusa e ferro esponja), aplica-se energia elétrica de acordo com um perfil de fundição controlado por computador. Em geral, o processo de produção em mini-mills consiste nas seguintes etapas:

- obtenção de matérias-primas;
- fundição;
- lingoteamento;
- laminação;
- trefilaria.

Figura 2.8



A diferença básica entre esse processo e o processo de produção de usinagem integrada descrito anteriormente é encontrada na primeira etapa do processamento, ou seja, na fabricação do aço. As mini-mills são unidades menores que as unidades integradas e oferecem algumas vantagens como:

- custo de capital mais baixo;
- riscos operacionais mais baixos pela não concentração de capital e capacidade instalada em uma única unidade de produção;
- proximidade de unidades de produção a fontes de matéria-prima;
- proximidade aos mercados locais e ajuste mais fácil dos níveis de produção;
- estrutura gerencial mais efetiva por causa da relativa simplicidade do processo de produção.

O princípio é transformar a energia elétrica em energia térmica, por meio da qual promove-se a fusão do ferro-gusa e/ou da sucata, em que as condições de temperatura e oxidação do metal líquido são bem controladas.

2.2 Diagrama ferro-carbono

Na prática, as ligas ferro-carbono são os materiais mais utilizados na indústria, uma vez que suas propriedades apresentam grande variação, de acordo com a quantidade de carbono existente, e ainda possibilitam uma gama maior de propriedades se considerarmos os tratamentos térmicos. As transformações em uma liga ferro-carbono são influenciadas basicamente pela temperatura e pelo teor de carbono. Levando em conta esses dois fatores, podemos montar um mapa das transformações que ocorrem e denominá-lo diagrama de equilíbrio (ver figura 2.9).

Nesse diagrama, podemos ver as fases presentes para cada temperatura, composição e também os pontos fundamentais para a compreensão das transformações.

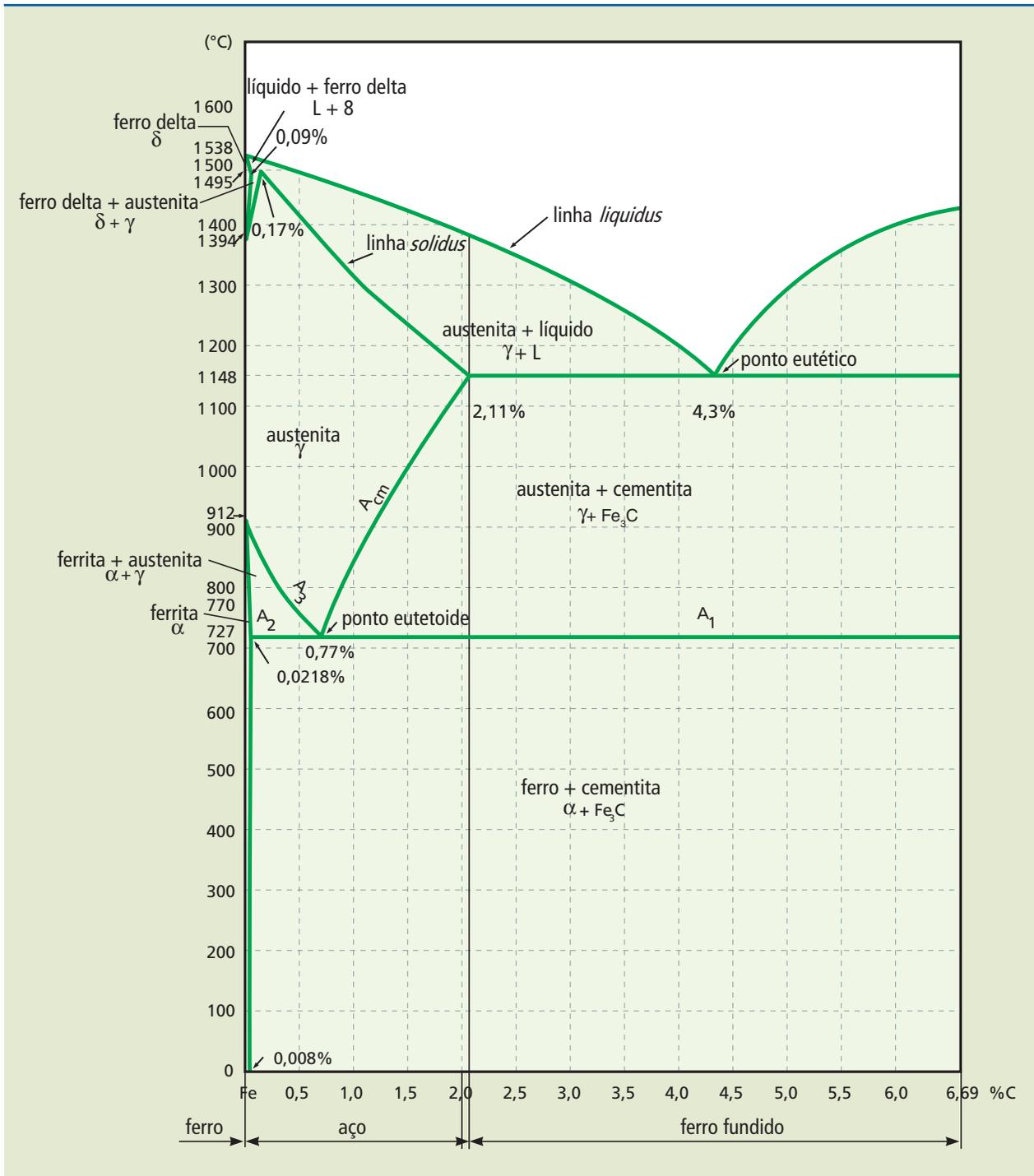
**Figura 2.9**

Diagrama de equilíbrio ferro-carbono.

2.2.1 Fases do diagrama ferro-carbono

Ferrita alfa (α)

Solução sólida de carbono em ferro CCC, existente até a temperatura de 912 °C. Caracteriza-se pela baixa solubilidade de carbono no ferro, chegando ao máximo de 0,0218% a 727 °C.

Austenita gama (γ)

Solução sólida de carbono em ferro CFC, existente entre as temperaturas de 912 °C e 1 495 °C, com solubilidade máxima de carbono no ferro de 2,11% a 1 148 °C.

Ferrita delta (δ)

Solução sólida de carbono em ferro CCC, mesmo estando o ferro em seu estado líquido, isto é, até a temperatura de 1 538 °C. Nessa condição térmica, o carbono praticamente não se solubiliza ou o grau de solubilização é muito baixo. O teor percentual que se pode atingir são valores limites de 0,09% (temperatura de 1 495 °C).

Cementita (Fe_3C)

É um carboneto de ferro de alta dureza com teor de carbono de 6,69%.

2.2.2 Linhas do diagrama ferro-carbono

Linha A_1

Indica a ocorrência de uma parada (*arrêt*) durante a transformação. Assim, ao resfriar um aço com 0,77% de C, observa-se uma “parada” na temperatura de 727 °C, ou seja, enquanto a transformação $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ não se completa, a temperatura permanece constante.

Linha A_2

Mostra a temperatura de transformação magnética do ferro CCC a 770 °C.

Linha A_3

Identifica a temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \alpha$. À medida que o teor de carbono aumenta, a temperatura A_3 diminui, até o limite de 727 °C, em que se encontra com A_1 .

Linha A_{cm}

Indica a temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$. Inicia a 727 °C com 0,77% de C e vai aumentando com a elevação do teor de carbono, até atingir 1 148 °C a 2,11% de C.

Linha *solidus*

Aponta que abaixo dessa linha todo material estará no estado sólido.

Linha *liquidus*

Indica que acima dessa linha todo material estará na forma líquida.



Na figura 2.10 vemos o esquema das estruturas das ligas Fe-C, na faixa correspondente aos aços, resfriados lentamente, conforme o diagrama de equilíbrio Fe-C.

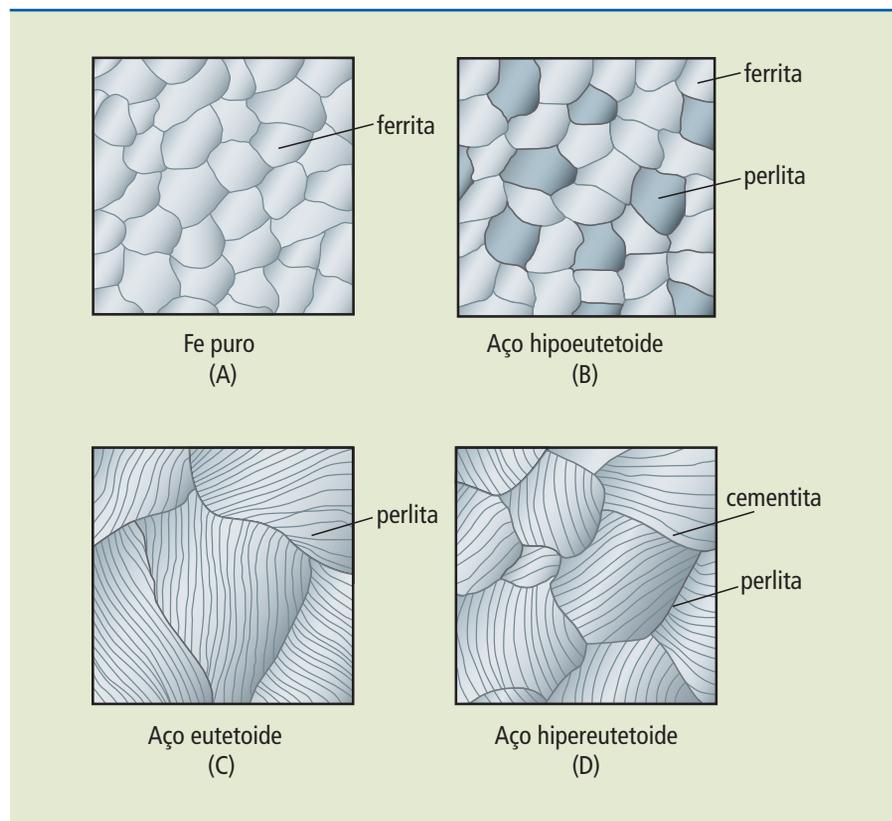


Figura 2.10

Aspecto micrográfico do aço.

2.3 Aços

O aço é o material mais empregado na maioria das construções mecânicas, por suas ótimas características mecânicas e sua adaptabilidade.

Os aços utilizados na construção mecânica são classificados em três grandes categorias:

- aços-carbono ou comuns;
- aços-liga;
- aços especiais.

2.3.1 Aço-carbono ou aço comum

Quando o único elemento de liga é o carbono, o material é designado aço-carbono ou aço comum.

Grandes variações de resistência e de dureza são obtidas pela modificação das porcentagens de carbono ou por tratamentos térmicos. Com base no diagrama de equilíbrio Fe-C, podem-se interpretar as reações que ocorrem nas faixas de composição correspondentes aos aços e que são responsáveis por tais variações.

O aço-carbono é o mais barato dos aços, razão pela qual ele é o preferido, exceto quando condições severas de serviço exigem características especiais, ou quando há necessidade de pequenas dimensões.

Os aços-carbono, de modo geral, cobrem todas as necessidades da prática. Com teor de 0,3% ou mais, pode ser tratado termicamente para melhorar suas propriedades de resistência e dureza. Mas surgem dificuldades em peças de grandes seções por causa do resfriamento lento do núcleo, o que impede as mudanças metalúrgicas requeridas para endurecimento e resistência.

O principal inconveniente do aço comum é sua pequena penetração de endurecimento, estendido apenas a uma fina camada. O resfriamento deve ser muito rápido, o que pode resultar em tensões residuais internas, distorções, perda de ductilidade e, eventualmente, trincas.

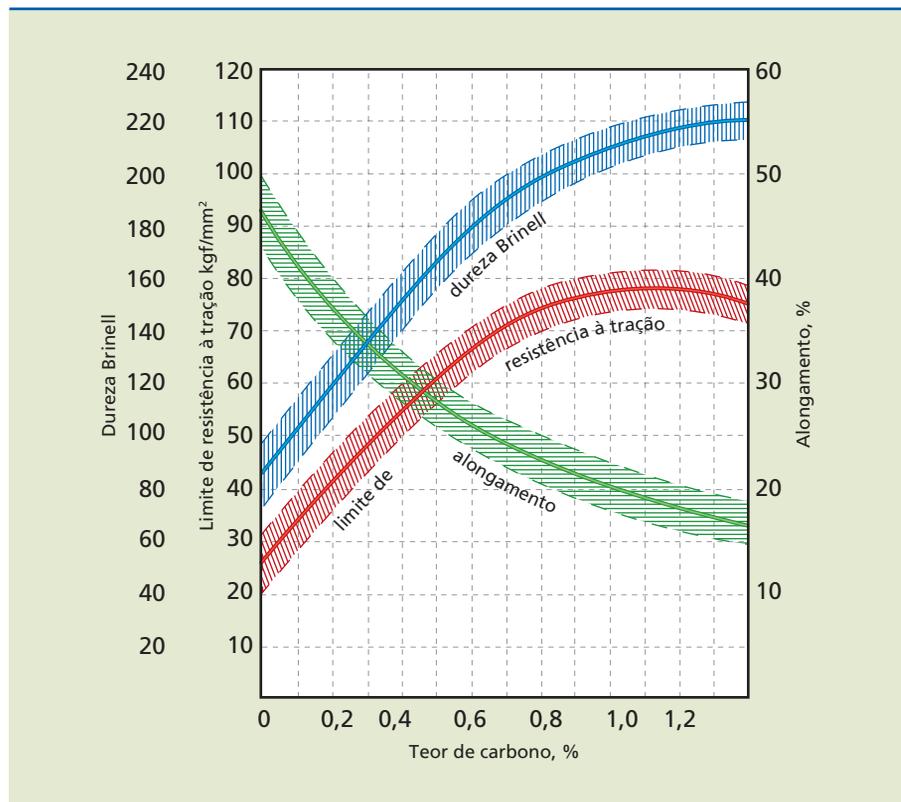
Os aços comuns podem ser classificados quanto à composição ou ao teor de carbono. A classificação norte-americana, praticamente adotada no mundo inteiro, define os seguintes padrões:

- aços de baixo teor de carbono: até 0,25% de carbono;
- aços de médio teor: de 0,25% a 0,6% de carbono;
- aços de alto teor: 0,6% a 2,0% de carbono.

A tabela 2.1 apresenta algumas indicações de utilização encontradas comumente na prática.

Figura 2.11

Propriedades mecânicas dos aços em função do teor de carbono.



Resumo dos principais aços para construção mecânica

1010	Aço ao carbono sem elementos de liga, para uso geral, utilizado em peças mecânicas, peças dobradas, partes soldadas, tubos e outras aplicações.
1020	Aço ao carbono, de uso geral, sem elementos de liga, utilizado em peças mecânicas, eixos, partes soldadas, conformadas ou cementadas, arames em geral etc.
1045	Aço com teor médio de carbono, de uso geral em aplicações que exigem resistência mecânica superior ao 1020 ou têmpera superficial (em óleo ou água), utilizado em peças mecânicas em geral.
9SMn28	Fácil de ser usinado, oferece bom acabamento superficial, mas é de difícil soldabilidade, exceto mediante o emprego de eletrodos de baixo teor de hidrogênio. Exemplo: E6015 (AWS). Usado comumente na fabricação de porcas, parafusos, conexões e outros produtos que necessitam de alta usinabilidade. Não deve, porém, ser utilizado em partes vitais de máquinas ou equipamentos sujeitos a esforços severos ou choques.
12L14	Tem características idênticas às do 9SMn28, com exceção da usinabilidade, pois apresenta capacidade superior a 60% em relação ao 9SMn28.
Teluraloy	De características idênticas às do 9SMn28, com exceção da usinabilidade, pois apresenta capacidade superior a 100% em relação ao 9SMn28. Possui algumas melhorias em relação ao 9SMn28 e 12L14, em trabalhos que necessitem de compressão, como roscas laminadas ou partes recartilhadas.
8620	Aço cromo-níquel-molibdênio, usado para cementação na fabricação de engrenagens, eixos, cremalheiras, terminais, cruzetas etc. (limite de resistência do núcleo entre 70 e 110 kgf/mm ²).
8640	Aço cromo-níquel-molibdênio de média temperabilidade, usado em eixos, pinhões, bielas, virabrequins, chavetas e peças de espessura média.
4320	Aço cromo-níquel-molibdênio para cementação que alia alta temperabilidade e boa tenacidade. Usado em coroas, pinhões, terminais de direção, capas de rolamentos etc. (limite de resistência do núcleo entre 80 e 120 kgf/mm ²).
4340	Aço cromo-níquel-molibdênio de alta temperabilidade, usado em peças de seções grandes como eixos, engrenagens, componentes aeronáuticos, peças para tratores e caminhões etc.
5140	Aço cromo-manganês para beneficiamento, de média temperabilidade, usado em parafusos, semieixos, pinos etc.
5160	Aço cromo-manganês de boa tenacidade e média temperabilidade, usado tipicamente na fabricação de molas semielípticas e helicoidais para veículos.
6150	Aço cromo-vanádio para beneficiamento que apresenta excelente tenacidade e média temperabilidade. Usado em molas helicoidais, barras de torção, ferramentas, pinças para máquinas operatrizes etc.
9260	Aço de alto teor de silício e alta resistência. Usado em molas para serviço pesado, como em tratores e caminhões.
52100	Aço que atinge elevada dureza em têmpera profunda, usado tipicamente em esferas, roletes e capas de rolamentos e em ferramentas como estampos, brocas, alargadores etc.

Tabela 2.1

Características dos principais aços.

Society of
Automotive
Engineers.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) padroniza os aços para construção mecânica segundo o teor de carbono, baseando-se nas normas **SAE**, com exceção de alguns aços que se baseiam nas normas **DIN**, identificados pela letra D anteposta.

Deutsches Institut
für Normung.

Na classificação SAE, a representação é feita por quatro algarismos. O primeiro algarismo indica:

- 1 = aço-carbono;
- 2 = aço-níquel;
- 3 = aço níquel-cromo;
- 4 = aço-molibdênio;
- 5 = aço-cromo;
- 6 = aço cromo-vanádio;
- 7 = aço-tungstênio;
- 8 = aço níquel-cromo-molibdênio;
- 9 = aço silício-manganês.

O segundo algarismo indica a porcentagem aproximada do elemento predominante da liga. Os dois últimos representam o teor médio de carbono contido em porcentagem. A tabela 2.2 apresenta as padronizações definidas pela ABNT.

Tabela 2.2

Algumas características mecânicas do aço-carbono especificadas pela ABNT.

Grupo	Exemplo	Tipo de aço
10XX	SAE 1020	aço-carbono comum
11XX	SAE 1120	aço de alto teor de enxofre
13XX	1322	aços ligados ao manganês
23XX	2340	aços ligados ao níquel
31XX	3135	aços ligados ao níquel e ao cromo
41XX	4140	aços cromo-molibdênio
43XX	4340	aços cromo-níquel-molibdênio
51XX	5160	aços ligados ao cromo
61XX	6140	aços ligados ao cromo e ao vanádio
86XX	8620	aços níquel-cromo-molibdênio

2.3.2 Aços-liga

Para melhorarmos a resistência mecânica de qualquer material metálico, podemos aplicar processos de fabricação por conformação mecânica, tratar o material termicamente ou acrescentar elementos de liga.

Podemos classificar um aço como aço-liga quando encontramos uma quantidade de elementos adicionados maior do que os encontrados nos aços-carbono comuns. Essa quantidade é responsável pela modificação e melhoria nas propriedades mecânicas do aço.

Dependendo da quantidade dos elementos adicionados, o aço-liga pode ser de baixa liga, se tiver até 5% de elementos de liga, ou de liga especial, se tiver quantidades de elementos de liga maiores do que 5%.

Os elementos de liga mais comumente adicionados ao aço são: níquel, manganês, cromo, molibdênio, vanádio, tungstênio, cobalto, silício e cobre. É possível adicionar mais de um elemento para obter um aço-liga.

O quadro da figura 2.12 mostra a influência dos elementos de liga na estrutura e nas propriedades do aço. Alguns dos aços-liga obtidos de um ou mais elementos apresentados no quadro são padronizados pela ABNT.

Os efeitos de cada um dos elementos de liga são detalhados a seguir.

Manganês (Mn)

O manganês aumenta a temperabilidade e reduz a temperatura de austenitização. Todos os aços-ferramenta comerciais contêm manganês para a redução de óxidos e evitar a fragilidade ocasionada pelo sulfeto de ferro. Aços-ferramenta podem conter até 2% de manganês, com 0,8 a 0,9% de carbono. Em alguns aços-liga o manganês substitui parcialmente o níquel com a finalidade de redução de custo de produção.

Figura 2.12

Influência na Propriedade	Elemento									
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al
Aumento da Resistência	x	x	x		x				x	
Aumento da Dureza	x	x	x		x					
Aumento da Resistência ao Impacto						x				
Redução da ductilidade	x		x	x						
Aumento da Resistência em altas temperaturas								x		
Aumento da Temperabilidade							x	x		
Ação Desoxidante		x			x					x
Aumento da Resistência à Corrosão							x			
Aumento da Resistência à Abrasão							x			
Redução da Soldabilidade	x									

Níquel (Ni)

O níquel aumenta a dureza do aço, sua resistência e ductilidade. Afina a estrutura sem prejuízo da usinagem. Atrasa o crescimento do grão. Em grandes quantidades, produz resistência à oxidação a altas temperaturas.

Cromo (Cr)

O cromo aumenta a temperabilidade do aço e contribui para a resistência ao desgaste e à dureza. Quando o cromo excede 11% em aços de baixo teor de carbono, uma camada é formada na superfície criando resistência aos oxidantes. Aços com cromo são mais fáceis de usinar do que aços com níquel de resistência mecânica similar. Os aços com cromo são usados em matrizes, rolamentos, limas e ferramentas, em que são necessárias durezas elevadas.

Molibdênio (Mo)

O molibdênio aumenta a usinabilidade dos aços-carbono e a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis.

É um elemento de alguns aços rápidos, aços resistentes à corrosão e a altas temperaturas.

Vanádio (V)

O vanádio aumenta a tenacidade e a resistência. Conserva a dureza dos aços em temperaturas elevadas. Evita o crescimento do grão. Aumenta a resistência à fadiga e ao choque.

Tungstênio (W)

O tungstênio aumenta a dureza do aço, a estabilidade a altas temperaturas, a profundidade de têmpera e a resistência à tração e ao desgaste. Em pequenas quantidades, melhora a resistência aos ácidos e à corrosão. Permite alcançar um elevado magnetismo no aço especial para eletroímãs.

Silício (Si)

O silício aumenta a resistência dos aços pobres em carbono. Em pequena quantidade, produz forte dureza, resistência ao desgaste e aos ácidos.

Outros elementos

Cobalto (Co)

Tem alta solubilidade em ferro alfa e gama, mas fraca tendência a formar carbetos. Reduz a temperabilidade, mas mantém a dureza durante o revenimento. É utilizado em aços para turbinas e como liga em metais duros. Intensifica a influência de elementos mais importantes em aços especiais.

Boro (B)

Tem sido usado com o objetivo de aumentar a temperabilidade. Em conjunto com o molibdênio, forma um grupo de aços bainíticos de alta resistência à tração. O boro é utilizado em algumas ligas para revestimento de superfícies.

2.3.3 Aços especiais

Aços Hadfield

O aço Hadfield é um material que, quando deformado, endurece bastante na zona deformada. Tal característica é obtida pela adição do manganês na proporção de 11% a 14% e carbono entre 1,1% e 1,4%. A adição do manganês nesse teor dá ao aço grande resistência a choques.

Aços-silício

São empregados quando são necessários materiais com boa permeabilidade magnética. Esse fenômeno ocorre porque o material tem resistência bastante elevada. São utilizados em motores, alternadores, transformadores e outros equipamentos. A composição desses aços varia dentro dos seguintes teores:

- C = 0,07;
- Mn = 0,4;
- Si = 2,4.

2.3.4 Aços inoxidáveis

Esse tipo de aço apresenta maior resistência à corrosão, quando submetido a determinado meio ou agente agressivo. Possui grande resistência à oxidação e a altas temperaturas em relação a outros tipos de aços.

A resistência à oxidação e à corrosão se deve à presença do cromo, que, em contato com o oxigênio, forma uma camada fina de óxido de cromo sobre a superfície do aço, tornando-o impermeável e resistente a oxidações. Assim, podemos definir como aço inoxidável o grupo de ligas ferrosas resistentes à oxidação e à corrosão, que contenham no mínimo 12% de cromo. O cromo favorece o endurecimento produzido pela têmpera em óleo, dificulta a ferrugem e, assim, mantém o material brilhante na atmosfera.

A alta resistência, combinada com a boa ductilidade, determinou o emprego do aço inoxidável quando resistência e leveza são importantes.

O aço inoxidável é classificado em três grupos, de acordo com a microestrutura básica formada:

- martensítico;
- ferrítico;
- austenítico.

Aço inoxidável martensítico

É obtido após aquecimento em altas temperaturas e resfriamento rápido. Possui como característica a alta dureza e fragilidade. Contém de 12% a 17% de cromo e de 0,1% a 0,5% de carbono (em certos casos até 1% de carbono) e pode atingir diversos graus de dureza após tratamento térmico. Dificilmente é atacado pela corrosão atmosférica no estado temperado e se destaca pela dureza. É, também, ferromagnético.

É um aço que apresenta trabalhabilidade inferior à das demais classes e soldabilidade muito ruim.

A padronização desse tipo de aço segue a norma AISI, cuja numeração distingue os teores de carbono, cromo e outros elementos de liga adicionados. Os tipos mais comuns são os aços 403, 410, 414, 416, 420, 420F, 431, 440A, 440B, 440C e 440F.

Os tipos 403, 410, 414, 416 e 420 caracterizam-se por baixo teor de carbono e um mínimo de 11,5% de cromo, que, no tipo 431, pode chegar a 17%.

Embora o carbono seja de baixo teor, esses aços possuem boa temperabilidade, por causa da presença do cromo. São usados em lâminas de turbinas e compressores, molas, eixos e hélices de bombas, hastes de válvulas, parafusos, porcas e outros equipamentos.

O tipo 420F possui carbono entre 0,30% e 0,40% e, nos tipos 440A, 440B e 440C, o teor de carbono é mais elevado (mínimo de 0,60% no tipo 440A e máximo de 1,20% no tipo 440C). Aqueles cujo teor de cromo varia de 12,0% a 18,0% são chamados “tipo cutelaria” e empregados em cutelaria, instrumentos cirúrgicos, molas, mancais antifricção etc.

Aço inoxidável ferrítico

Possui de 16% a 30% de cromo. Não pode ser endurecido por tratamento térmico e é basicamente usado nas condições de recozido. Depois de ser aquecido a altas temperaturas e resfriado rapidamente, apresenta estrutura macia e tenaz.

Possui maior usinabilidade e resistência à corrosão que o aço martensítico por causa do maior teor de cromo. Apresenta boas propriedades físicas e mecânicas e é efetivamente resistente à corrosão atmosférica e a soluções fortemente oxidantes. É, também, ferromagnético.

As aplicações principais são aquelas que exigem boa resistência à corrosão, ótima aparência superficial e requisitos mecânicos moderados. Apresenta tendência ao crescimento de grãos após soldagem, particularmente para seções de grande espessura, e, portanto, experimentam alguma forma de fragilidade.

Os principais tipos designados pela AISI são: 405, 406, 430, 430F, 442, 443 e 446. São aplicados em equipamentos para a indústria química, para res-

taurantes e cozinhas, peças de fornos e em componentes arquitetônicos ou decorativos.

Aço inoxidável austenítico

Tem como elemento de liga o níquel, que proporciona uma alteração em sua estrutura capaz de elevar a resistência mecânica e tenacidade. Apresenta excelente resistência à corrosão em muitos meios agressivos.

Outros elementos, como molibdênio, titânio e nióbio, se adicionados podem melhorar a resistência à corrosão.

Dos três grupos, os aços austeníticos são os que apresentam maior resistência à corrosão. Eles têm baixo limite de escoamento com alta resistência à tração e bom alongamento e oferecem as melhores propriedades para trabalho a frio. Não aceitam tratamento térmico, mas sua resistência à tração e sua dureza podem ser aumentadas por encruamento. Não são ferromagnéticos. Apresentam boa usinabilidade e soldabilidade.

Os tipos AISI mais comuns são designados pelos números 301, 302, 302B, 303, 304, 308, 309, 309S, 310, 316, 317, 321 e 347. As aplicações desses aços inoxidáveis são: peças decorativas, utensílios domésticos, peças estruturais, componentes para indústria química, naval, alimentícia, de papel e até mesmo componentes que devam estar sujeitos a temperaturas elevadas, como peças de estufas e fornos, pela boa resistência à oxidação.

2.3.5 Aços rápidos

Os aços rápidos são aqueles que, depois de endurecidos por tratamento térmico, mantêm a dureza. Apresentam como elementos de liga o vanádio, o tungstênio e o cromo.

A maior eficiência dos aços rápidos foi conseguida pela adição do cobalto. A adição de 5% de cobalto ao aço com 18% de tungstênio faz aumentar a eficiência em 100%. Com a adição do cobalto, consegue-se usinar até o aço manganês. Quanto maior o teor de cobalto, mais frágil se torna o aço. Adicionando o vanádio a essa liga, melhora a fragilidade. Por esse motivo, nos aços rápidos, o vanádio é sempre adicionado proporcionalmente ao cobalto.

2.3.6 Aços para ferramentas

Com a Revolução Industrial aumentou a busca por ferramentas que pudessem oferecer melhor custo/benefício, maior vida útil e resistir a situações mais severas. As características e propriedades de novos materiais tiveram de ser estudadas, e novas ligas especiais para ferramentas foram produzidas. Exemplos típicos são os aços rápidos, desenvolvidos por Taylor em 1900.

Existem atualmente no mercado diversos tipos de aços ferramenta. Os técnicos e pessoas envolvidos em um projeto devem consultar o produtor, pois em geral

são desenvolvidos diversos tipos de liga com composição química variada para diferentes aplicações.

Em geral, a seleção correta de um aço para ser utilizado em ferramenta deve ser feita correlacionando-se as características metalúrgicas do material com as exigências de desempenho. O principal critério é o custo da ferramenta para a fabricação de determinado produto.

Esses aços usados na fabricação de ferramentas, por causa da grande solitação mecânica, têm de apresentar boa ductibilidade, tenacidade, resistência ao desgaste. Por esse motivo, a maioria contém elevados teores de elementos de liga, combinados com altos teores de carbono.

Aços para trabalho a frio

Ferramentas para trabalho a frio são utilizadas em temperaturas próximas da temperatura ambiente em operações como conformação, corte, usinagem e outras.

Suas principais características são:

- evitar a perda de corte rapidamente para ferramentas de corte;
- minimizar os desgastes para ferramentas de conformação;
- boa tenacidade para evitar que a ferramenta quebre.

Em geral para aplicação a frio, pesquisam-se aços com elevado teor de carbono, alto teor de cromo (ver tabela 2.3) e com tratamento térmico específico (têmpera seguida de revenimento) para obter alta dureza, elevada resistência ao desgaste e boa tenacidade.

Tabela 2.3
Composições básicas e algumas aplicações de aços para trabalho a frio.

Aço	Composição química						Aplicações (Exemplos)
	% C	% Cr	% Mo	% V	% W	% Nb	
AISI D2	1,50	12,0	1,00	1,00	–	–	Matrizes para corte, lâminas para corte a frio.
AISI D3	2,00	12,5	–	0,20	–	–	Facas para tesouras, feiras para trefilação.
AISI D6	2,00	12,5	–	0,07	1,00	0,15	Moldes para prensagem de cerâmicos, facas para corte de chapas.
AISI W2	1,00	5,15	–	–	–	–	Matrizes pesadas e de formas complexas, calibres, feiras.

Aços para trabalho a quente

Em geral, utilizam-se aços de baixa liga para matrizes de forjamento e trabalho a quente. Diferentemente dos aços para trabalho a frio, os aços empregados para trabalho a quente (ver tabela 2.4), na maioria de suas aplicações, são utilizados

com baixos teores de carbono (0,25% a 0,60%). Algumas propriedades são necessárias para a vida útil desses aços ser mais bem aproveitada:

- resistência ao impacto;
- usinabilidade;
- resistência à deformação em temperaturas elevadas;
- resistência a trincas por causa das altas temperaturas.

Podem ser encontrados aços ferramenta para trabalho a quente em diversas aplicações, tais como:

- moldes para fundição sob pressão de materiais não ferrosos como alumínio, zinco e outros;
- moldes para injeção de plásticos;
- ferramentas para corte a quente.

Tabela 2.4

Composições básicas e algumas aplicações de aços para trabalho a quente.

Aço	Composição química						Aplicações (Exemplos)
	% C	% Cr	% Mo	% V	% W	% Nb	
AISI H11	0,40	5,25	1,30	0,40	–	–	Matrizes para trabalho a quente, moldes para fundição sob pressão de ligas leves.
AISI H12	0,40	5,30	1,45	0,25	1,30	–	Tesouras, pulsões, mandris e facas para trabalho a quente.
AISI H13	0,40	5,25	1,40	0,90	–	–	Matrizes para forjamento e estampagem a quente.
AISI H20	0,30	2,65	–	0,35	8,50	–	Tesouras para corte a quente e mandris para fabricação de molas.

2.4 Ferros fundidos

Os ferros fundidos são fabricados com ferro-gusa. São ligas de ferro e carbono com teor elevado de silício. Nesse caso, o carbono está presente com valores situados entre 2% e 4,5%.

Como são compostos de três elementos: ferro, carbono (2% a 4,5%) e silício (1% a 3%), são chamados de liga ternária. Quando acrescentamos outros elementos de liga para dar alguma propriedade especial à liga básica, é chamado de ferro fundido ligado.

Dependendo da quantidade de cada elemento e da maneira como o material é resfriado ou tratado termicamente, o ferro fundido é cinzento, branco, maleável ou nodular. O que determina a classificação em cinzento ou branco é a aparência da fratura depois do resfriamento. Essa aparência, por sua vez, é determinada pela forma como o carbono se apresenta depois que a massa metálica solidifica.

2.4.1 Ferro fundido cinzento

O nome cinzento se deve à fratura ser de coloração escura, por causa da grafita. Sua microestrutura apresenta grafita em forma de lamelas ou veios. Essa grafita pode atuar como lubrificante natural durante a usinagem, além de proporcionar a quebra de cavacos tornando algumas dessas ligas fáceis de usinar.

O ferro fundido cinzento apresenta propriedades tais como: dureza, boa usinabilidade e capacidade de amortecer vibrações. Tem maior capacidade de amortecimento do que o aço por causa dos veios de grafita, que, por não terem nenhuma resistência mecânica, funcionam como vazios, o que permite a deformação plástica do material localizado ao redor deles.

É empregado em blocos e em cabeçote de motor, bases de máquinas etc.

Classificação

Os ferros fundidos são classificados segundo as normas da ABNT e da DIN. Os ferros fundidos cinzentos, por exemplo (ver figura 2.13) são designados por FC, pela ABNT, ou GG, pela norma DIN, e os algarismos que acompanham indicam o limite de resistência à tração. Exemplo: FC20 significa ferro fundido cinzento com limite de resistência em 200 MPa, ou aproximadamente 20 kgf/mm².

Figura 2.13

Ferro fundido cinzento, com evidência das lamelas ou veios de grafita.

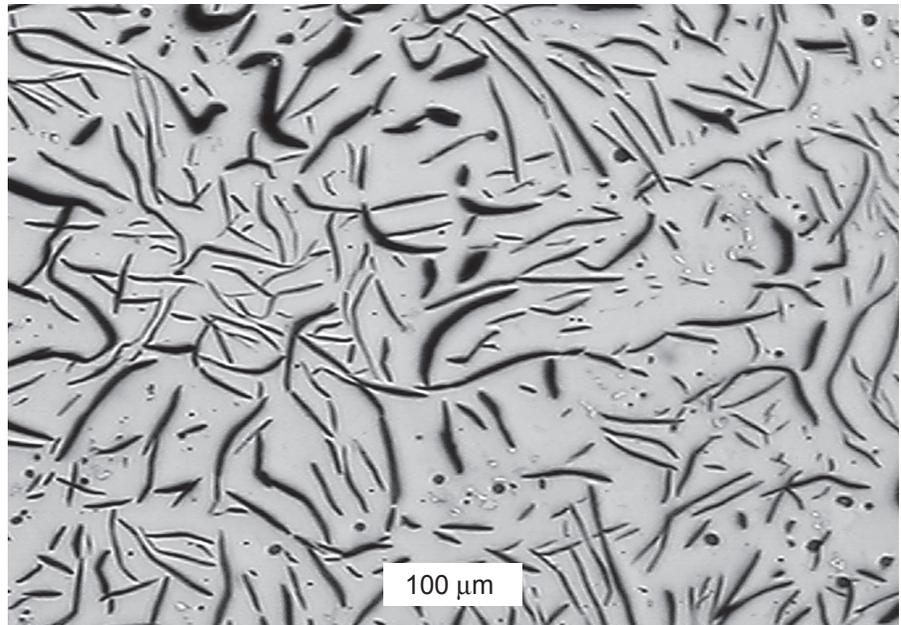


FOTO OBTIDA EM LABORATÓRIO / UNINEP

2.4.2 Ferro fundido branco

O ferro fundido branco (ver figura 2.14) é formado no processo de solidificação, quando não ocorre a formação da grafita e todo o carbono assume a forma de

carboneto de ferro (cementita). Daí sua cor clara. Para que isso aconteça, tanto os teores de carbono quanto os de silício devem ser baixos, e a velocidade de resfriamento tem de ser maior. Nos ferros fundidos brancos ligados, elementos como o cromo, o molibdênio e o vanádio funcionam como estabilizadores dos carbonetos, aumentando a dureza.

Uma das propriedades físicas do ferro fundido branco é a dureza elevada, que o torna frágil, apesar de ser resistente ao desgaste, à abrasão e também à compressão. Essas propriedades físicas permanecem inalteradas mesmo nas altas temperaturas. Portanto, esse tipo de material é empregado em diversos equipamentos das indústrias de transformação química, mecânica, que exigem fragmentação de partículas, e também nos equipamentos destinados à agroindústria.

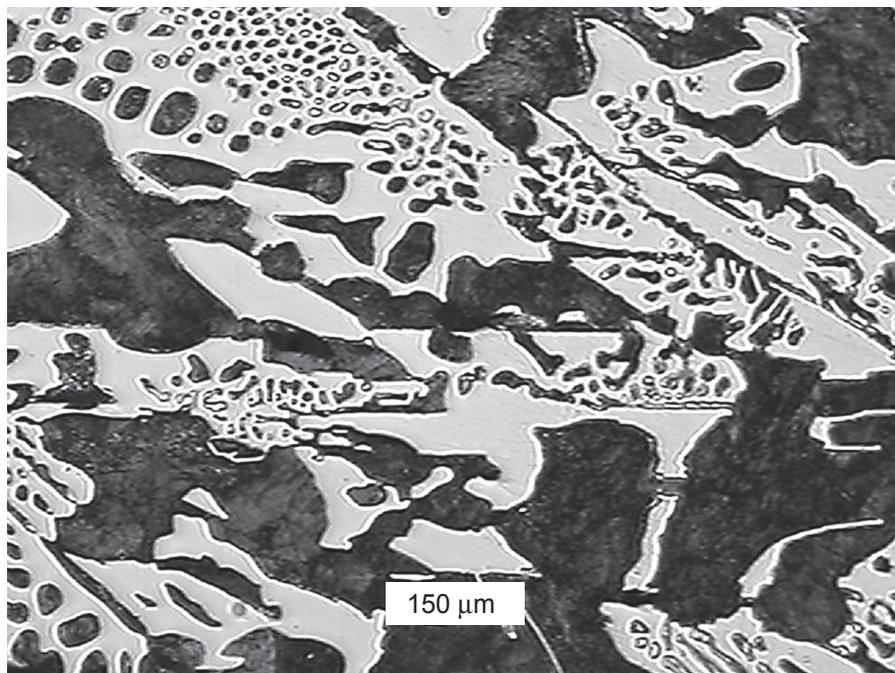


FOTO OBTIDA EM LABORATÓRIO / UNIMEP

Figura 2.14

Ferro fundido branco atacado com nital (solução de álcool e ácido nítrico).

2.4.3 Ferro fundido maleável

O ferro fundido maleável é produzido a partir de um ferro fundido branco submetido a tratamento térmico, por várias horas. Esse tratamento torna as peças fabricadas com esse material mais resistentes a choques e deformações. Dependendo das condições do tratamento térmico, o ferro pode apresentar o núcleo preto ou branco.

É um material que tem as vantagens do aço e as do ferro fundido cinzento. Assim, possui ao mesmo tempo alta resistência mecânica a elevada fluidez no estado líquido, o que permite a produção de peças complexas e finas.

2.4.4 Ferro fundido nodular

É caracterizado por apresentar em sua microestrutura (ver figura 2.15) grafita sob a forma esferoidal ou nódulos. Isso é obtido com a adição de elementos de liga, como magnésio e cério, no metal ainda líquido.

Por meio de tratamentos térmicos adequados, esse material pode apresentar propriedades mecânicas, como ductilidade, tenacidade, usinabilidade, e resistências mecânica e à corrosão melhores do que as de alguns aços-carbono.

O ferro fundido nodular está substituindo alguns tipos de aços e ferros fundidos maleáveis na maioria de suas aplicações, pelo menor custo de processamento. É conhecido também como ferro fundido dúctil.

Figura 2.15

Microestrutura bainítica

