

# 1

## CAPÍTULO

# O AÇO COMO MATERIAL

# 1. Introdução

Produtos de ferro são usados pelo homem desde, pelo menos, 1200 a.C. Embora o ferro seja um dos cinco elementos mais abundantes na crosta terrestre, em peso, as ocorrências de ferro metálico na natureza são raras, normalmente associadas a meteoritos. Assim, para obter produtos de ferro, o homem desenvolveu processos para extraí-lo dos minérios de ferro mais comuns, aqueles à base de óxido de ferro. O fato de que os combustíveis mais facilmente encontrados na natureza são ricos em carbono e o carbono, em condições adequadas, pode reduzir o óxido de ferro a ferro metálico foi decisivo no desenvolvimento de produtos e artefatos à base de ferro.

A presença de carbono durante as principais etapas do processamento usado para obter produtos de ferro também deve ter sido responsável pela observação de que este elemento, adicionado ao ferro, produz importantes efeitos sobre suas propriedades, dando origem às principais ligas de ferro: aços e ferros fundidos.

Durante muitos séculos, a produção de ferro e suas ligas prosseguiu de forma artesanal, envolvendo diversos tipos de processos de redução<sup>(1)</sup> associados a trabalho mecânico e algum controle das condições de aquecimento e resfriamento (Capítulo 2). Somente com a percepção de que adições significativas de carbono reduziam sensivelmente o ponto de fusão das ligas de ferro e viabilizavam a produção, em escala industrial, de metal rico em ferro, líquido, no século XVIII teve início a produção em grande escala de ligas ferrosas. Partindo de cerca de 40000 t anuais em 1856 chegou-se à situação presente, no início do século XXI, em que cerca de 1000 Mt<sup>(2)</sup> de aço são produzidas anualmente.

A evolução da aplicação do aço como material de engenharia se deve a diversos fatores técnicos e econômicos. Notadamente, nas últimas décadas do século XX, o conhecimento acumulado sobre as relações entre composição química, estrutura, propriedades e desempenho e o efeito do processamento sobre estas características atingiu um nível que vem permitindo o incessante desenvolvimento “científico” de novas ligas e o aprimoramento das ligas existentes. Uma das ferramentas importantes no desenvolvimento deste conhecimento foi, e continua sendo, a metalografia. A compreensão das relações entre propriedades e estrutura, na escala de micrômetros ( $\mu\text{m}$ ,  $10^{-6}$  m) até milímetros (mm,  $10^{-3}$  m) depende, fundamentalmente, da metalografia, ciência estabelecida a partir dos primeiros estudos de Henry Clifton Sorby em Sheffield, na Inglaterra, na década de 1860. Complementada por um conjunto de outras importantes ferramentas de caracterização dos metais, a metalografia se tornou tão essencial à compreensão do comportamento dos aços que praticamente todos os cursos de engenharia de materiais dedicam um tempo significativo a seu ensino e é praticamente impossível encontrar uma indústria que produza ou processe aço que não utilize ferramentas metalográficas, em alguma etapa de seu desenvolvimento, controle da qualidade ou análise de falha.

---

(1) Redução: converter do estado oxidado ao estado neutro ( $\text{Fe}^{+3} + 3 \text{e}^- = \text{Fe}$ ); o oposto de oxidação.

(2) As unidades e prefixos do sistema internacional são empregados, exceto quando indicado de outra forma.

## 2. Aços e Ferros Fundidos

Ligas<sup>(3)</sup> à base de ferro ocupam lugar de destaque entre os materiais industriais há, pelo menos, dois séculos. Existem duas famílias principais de ligas à base de ferro: aços e ferros fundidos. Os aços são as ligas à base de ferro mais amplamente aplicadas. Uma das características mais importantes que diferencia os aços dos ferros fundidos é a capacidade que os aços têm de serem deformados plasticamente.

Vários fatores contribuem para a importância que o aço tem, presentemente, dentre os materiais industriais: a abundância do ferro encontrado em minérios na crosta terrestre, o custo relativamente baixo de produção atingido nas usinas modernas e as notáveis combinações de propriedades físicas e mecânicas capazes de serem atingidas são alguns dos fatores classicamente importantes. Atualmente os aços são especialmente valorizados, também pela facilidade de serem reciclados, pela vida relativamente curta quando descartados e pelo consumo específico de energia relativamente baixo em sua produção, fatores que levam a sua caracterização como material de elevada “sustentabilidade”.

A possibilidade de se obter desempenho extraordinário do aço, associada às notáveis combinações de propriedades físicas e mecânicas, está intimamente ligada à capacidade de se manipular as suas características, através do processamento, de modo a obter as combinações de composição química e estruturas (em várias escalas) mais favoráveis para determinada aplicação.

## 3. Estrutura

O conceito de estrutura é fundamental na Engenharia de Materiais e na Metalurgia. Embora a estrutura atômica seja importante para a definição de alguns aspectos do comportamento dos materiais, a análise clássica começa na estrutura cristalina. A maior parte dos metais e ligas industriais e praticamente todos os aços são empregados em condições em que os átomos se organizam regularmente em cristais. O modo como os átomos de um metal ou de uma liga se organizam em um cristal define uma série de propriedades deste metal. Ligas ferrosas que têm estrutura cúbica de face centrada (CFC), por exemplo, não são magnéticas, enquanto as ligas de estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) são ferromagnéticas a temperatura ambiente. Assim, a estrutura, na escala cristalina (nm,  $10^{-9}$  m), é importante para definir o desempenho de um aço.

Itens produzidos em aço raramente são compostos por um só cristal ou mesmo por uma fase, apenas. A maneira como os diferentes cristais se organizam na estrutura policristalina, suas dimensões e forma, assim como a quantidade de cada uma das fases eventualmente presentes são características que, em geral, ocorrem em uma escala de dimensões que se convencionou chamar de escala “microestrutural” ( $\mu\text{m}$ ).

A produção de itens de aço em grande escala e com taxas de produção compatíveis com uma produção mundial da ordem de 1000 Mt/ano (dados de 2004) conduz a heterogeneidades de composição química e

---

(3) Ligas são misturas de dois ou mais elementos químicos, sendo ao menos um metálico, das quais resulta um produto com características metálicas.

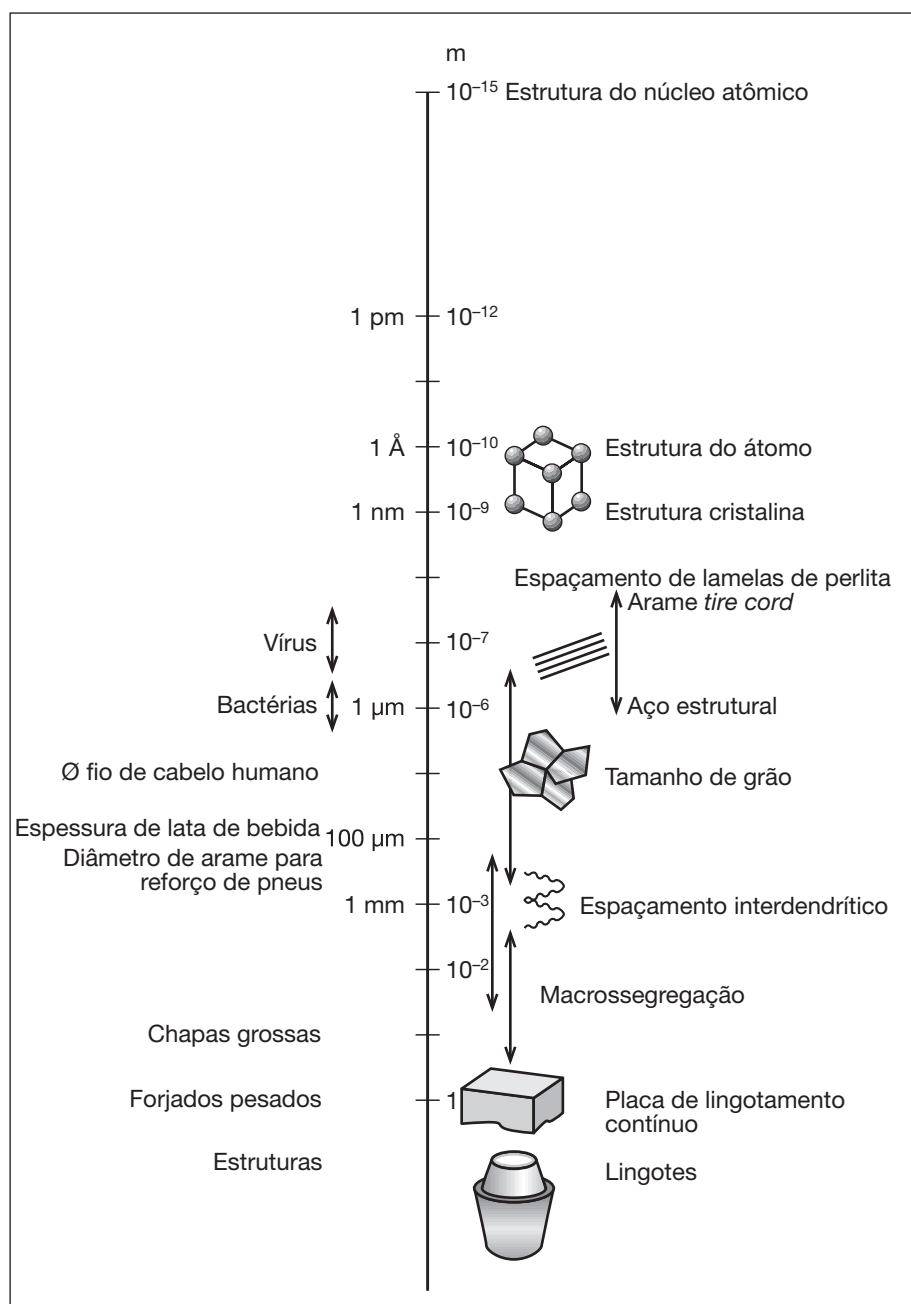
de propriedades em uma escala ainda superior, chamada macroestrutura (mm).

A Figura 1.1 apresenta, esquematicamente, características estruturais de aços, em cada uma das escalas mencionadas.

O controle da estrutura (em todas as suas escalas) é uma das ferramentas mais importantes para a obtenção de aços com as propriedades e desempenho desejados.

**Figura 1.1**

Diferentes escalas em que a estrutura dos materiais se desenvolve. No lado esquerdo, são incluídas as dimensões aproximadas de alguns objetos, para referência.

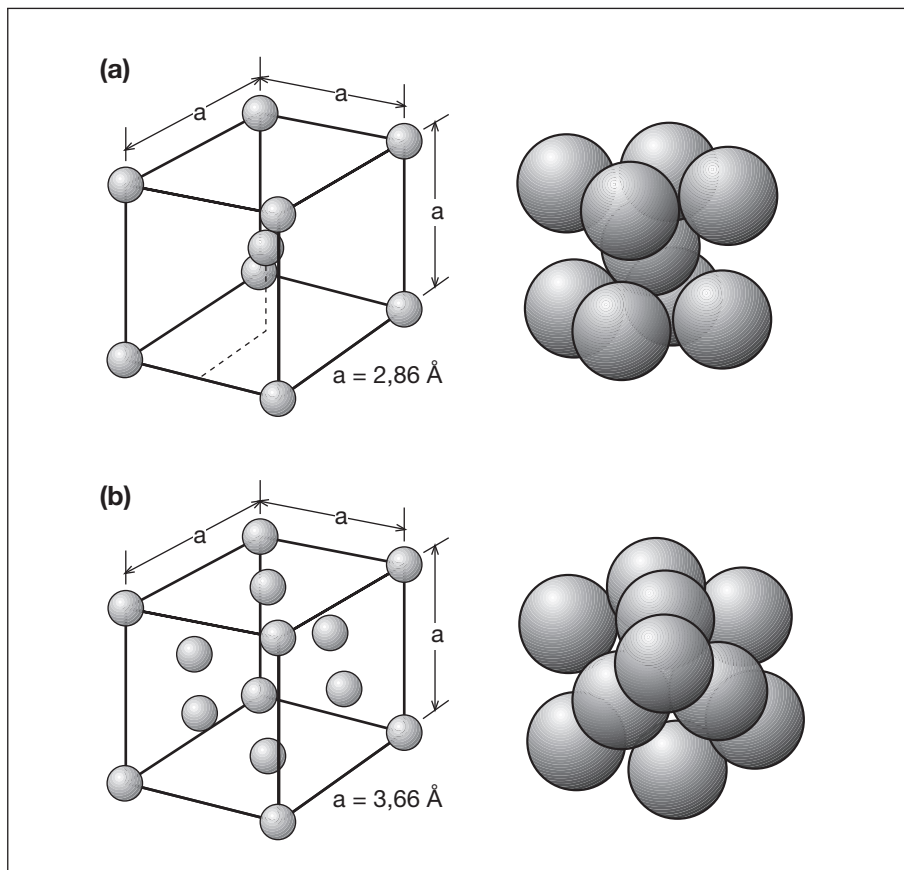


## 4. A Estrutura Cristalina das Ligas de Ferro

A maior parte dos metais apresenta, à pressão ambiente (1 atm) uma única estrutura cristalina, estável desde a temperatura ambiente até seu ponto de fusão. As estruturas de ocorrência mais comum são as estruturas compactas CFC e HCP (hexagonal compacta) e a estrutura não-compacta CCC. O ferro é excepcional, neste aspecto, e apresenta polimorfismo, isto é, apresenta duas estruturas cristalinas à pressão ambiente, dependendo da temperatura. A baixas temperaturas (até 910 °C) o ferro tem a estrutura CCC. Acima desta temperatura, a estrutura CFC se torna mais estável. Acima de 1394 °C a estrutura CCC volta a ser estável até o ponto de fusão do ferro (1535 °C). Assim, as diferentes fases<sup>(4)</sup> do ferro são estáveis em diferentes faixas de temperatura (e de pressão) (Figura 1.2)<sup>(5)</sup>.

A possibilidade de realizar e controlar a transformação de aços entre estas duas estruturas é uma das ferramentas mais úteis e mais amplamente empregadas no controle da estrutura dos produtos de aço.

O arranjo dos átomos em determinada estrutura cristalina está ligado às interações entre estes átomos. Quando átomos de outros elementos são misturados aos átomos de ferro, formando uma liga, a presença destes átomos afeta a estabilidade dos diferentes arranjos de átomos. Assim, por exemplo, a adição de carbono ao ferro produz alterações na estabilidade relativa entre as fases. Uma maneira de representar estas



**Figura 1.2**

(a) Estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). O parâmetro de rede do ferro puro, a temperatura ambiente, é de 2,86 Å<sup>(6)</sup>. (b) Estrutura cúbica de face centrada (CFC). O parâmetro de rede do ferro puro à temperatura de 1200 °C é de aproximadamente 3,66 Å.

(4) Fase é uma porção homogênea de um sistema. Em geral, uma fase é caracterizada pelo seu estado físico, estrutura cristalina (no caso de fases sólidas) e composição química. Alguma heterogeneidade de composição química pode existir dentro de uma fase.

(5) Para melhor visualizar as estruturas veja: <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/Lattices/iron.html>

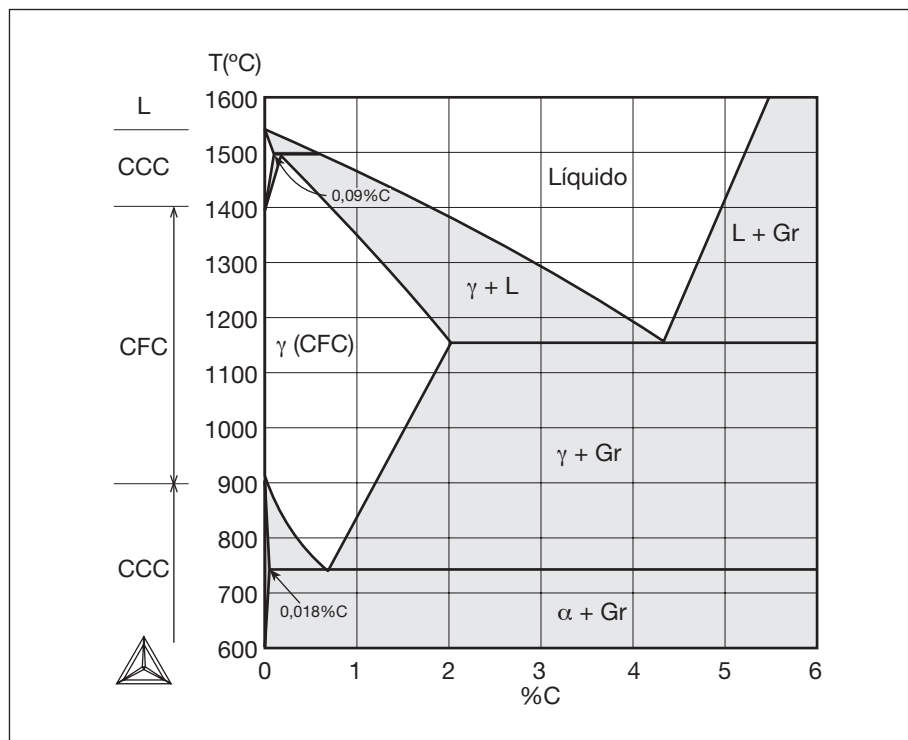
(6) Å, Angstrom. 1 Å = 0,1 nm. Unidade de comprimento, cujo nome homenageia Anders Jonas Ångström (1814-1874), físico sueco, pioneiro da espectroscopia.

alterações é através de um diagrama de equilíbrio de fases, como o mostrado na Figura 1.3. Observa-se, neste diagrama, que a adição de carbono reduz o ponto de fusão das ligas de ferro até cerca de 4,2% C e que até cerca de 0,8% C a adição de carbono aumenta a estabilidade da estrutura CFC em relação a CCC.

Assim, a adição de elementos de liga ao ferro permite alterar a estabilidade relativa das fases e, conseqüentemente, afetar a estrutura que se formará em um aço. Estes elementos têm ainda outros efeitos importantes que serão discutidos posteriormente.

**Figura 1.3**

Diagrama de equilíbrio de fases Fe-C. As transformações de fase do ferro puro estão indicadas ao lado do eixo vertical (0%C) correspondente ao ferro puro. A região de temperatura, em que a fase CFC (chamada  $\gamma$ , ou austenita) é estável, aumenta com a adição de carbono. A fase CCC (chamada ferrita) à baixa temperatura, só é capaz de dissolver, no máximo, 0,018%C, enquanto que, à alta temperatura, a solubilidade é de 0,09%C. Acima destes teores de carbono, outras fases mais estáveis começam a se formar.



## 5. Caracterização de Aços

A combinação de composição química e estrutura é responsável pela definição das propriedades de um aço. A caracterização da composição química é feita através de diversos métodos e técnicas de análise química. A caracterização da estrutura é realizada, também, através de várias técnicas analíticas que dependem, fundamentalmente, da escala da estrutura que se deseja caracterizar. A Tabela 1.1 apresenta algumas das técnicas de caracterização estrutural de metais em função da escala a que se aplicam.

As técnicas metalográficas (micrográficas e macrográficas) aplicam-se à caracterização da estrutura, em escala micro e macroscópica, respectivamente. A maior parte das características estruturais determinantes para o desempenho dos metais está na faixa de 10 nm até 1 mm, faixa coberta por diversas técnicas metalográficas. Daí vem a importância da metalografia para o desenvolvimento e controle das características dos aços.

As diversas técnicas metalográficas são discutidas em mais detalhes nos Capítulos 4, 5 e 6.

**Tabela 1.1**

Técnicas de caracterização usuais para metais.

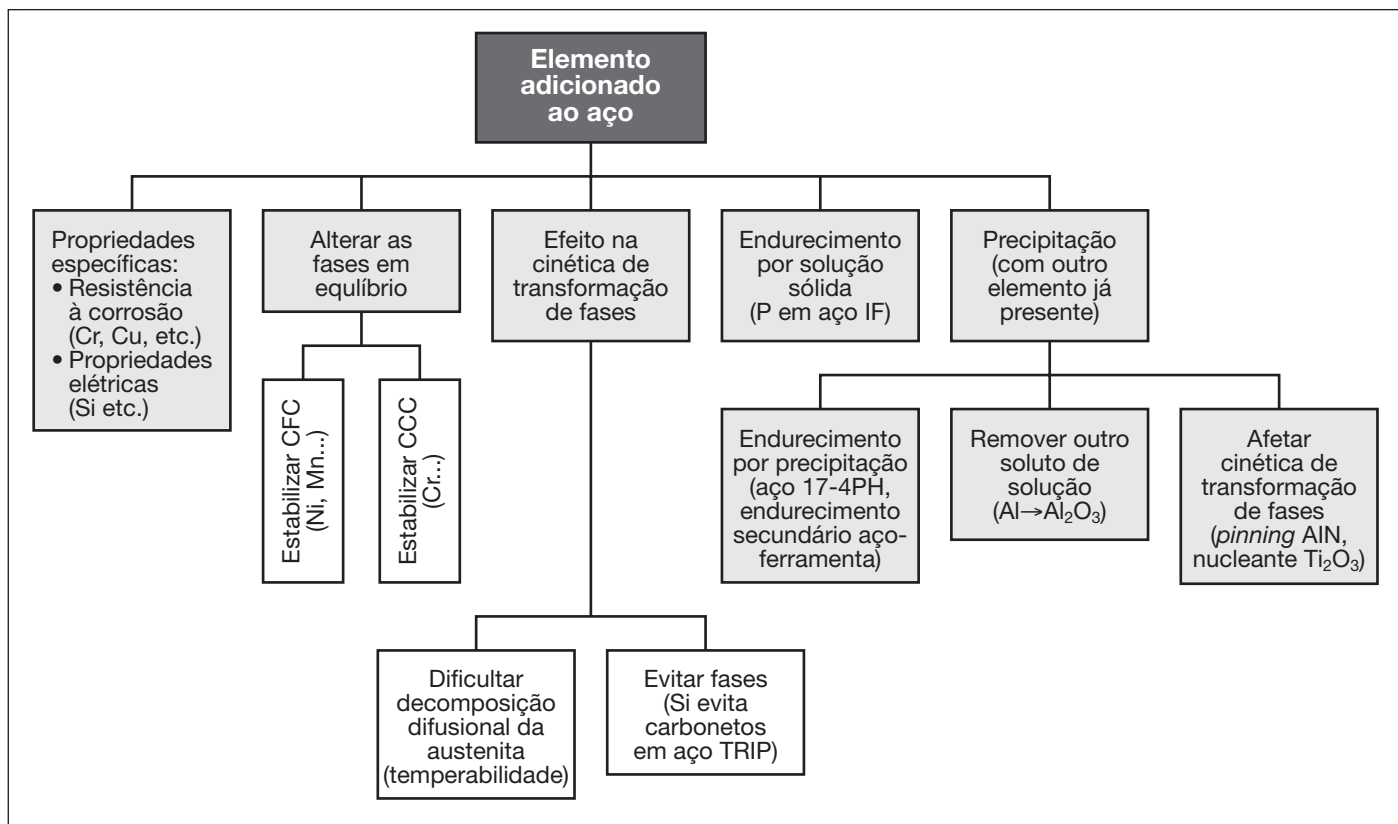
<b>Escala</b> (valores de dimensões aproximados)	<b>Técnica de caracterização</b>
Estrutura cristalina (Å)	Difração de raios X Microscopia eletrônica de transmissão (difração de elétrons)
Características estruturais na faixa de 10-100 nm (discordâncias, falhas de empilhamento, grãos ultrafinos etc.)	Microscopia eletrônica de transmissão
100 nm-1000 µm	Microestrutura eletrônica de varredura Microscopia de força atômica
1 µm-1000 µm	Microscopia ótica Microscopia confocal laser
1-1000 mm	Macrografia

## 6. Composição Química dos Aços

Além do carbono, que nem sempre é um elemento desejado no aço, vários elementos químicos podem estar presentes na composição do aço. Quando os elementos não são adicionados deliberadamente, são chamados de “residuais”. Embora seja consagrada a nomenclatura “elementos de liga” para os demais elementos adicionados ao aço visando afetar seu comportamento, é freqüente omitir-se, das discussões, diversos elementos críticos para o desempenho do aço que não se classificam diretamente como residuais ou como elementos de liga, como usualmente entendido. A Figura 1.4 apresenta um resumo das principais funções dos elementos adicionados ao aço. Além disto, devem ser considerados os elementos residuais, provenientes da sucata, principalmente, tais como cobre, arsênico, antimônio, zinco, chumbo<sup>(7)</sup>, e elementos provenientes da atmosfera, como nitrogênio e hidrogênio e o oxigênio, agente de refino amplamente empregado e que se dissolve no aço (Capítulo 2).

Os diferentes efeitos dos elementos adicionados ao aço, listados na Figura 1.4 são discutidos nos capítulos a seguir.

(7) Diversos elementos podem ser considerados residuais, em um aço, e adições deliberadas (“elementos de liga”), em outros. Por exemplo: cobre é uma adição deliberada em aços estruturais patináveis e chumbo pode ser adicionado em aços para corte fácil, embora este emprego venha sendo reduzido, devido ao impacto ambiental.

**Figura 1.4**

Apresentação esquemática das principais funções dos elementos adicionados ao aço. Alguns exemplos são incluídos, entre parênteses, em cada função. Naturalmente, há elementos que cumprem mais de uma função no projeto de liga (*alloy design*) de um aço.