

### Introdução

Do ponto de vista da produção industrial, quanto melhores forem as propriedades mecânicas de um material qualquer, melhor será sua utilização. Isso serve, tanto durante o processo de fabricação quanto durante o uso da peça já fabricada.

Não muito depois de ter aprendido a usar o cobre, o homem percebeu que o bronze, uma mistura de cobre e estanho, era muito melhor do que o metal puro. Embora desconhecesse a estrutura interna do bronze, ele percebeu que esse material era mais duro.

Mesmo para quem até agora não tinha parado para pensar, a sofisticação dos processos de fabricação e dos produtos industriais à disposição no mercado dá uma pista do que se está fazendo por aí em termos de “mistura” de metais e o que isso traz de benefício ao metal-base dessa mistura. E essa pesquisa começa em laboratórios que precisam atender a necessidades sofisticadas, como a construção de naves espaciais, satélites, aviões ou carros de Fórmula 1. Daí, para os produtos que estão na cozinha de nossa casa, é um passo muito pequeno.

Com o aço, o material mais usado na indústria mecânica, não podia ser diferente. Seja pelo controle da quantidade de carbono e de impurezas, seja pela adição de outros elementos, ou por meio de tratamento térmico, é possível fazer com que ele tenha um desempenho muito melhor no processo de fabricação e na utilização que a gente faz da peça depois de fabricada.

Nesta lição, você vai estudar os outros metais que a gente pode misturar ao aço para que ele fique melhor ainda. E vamos dizer

também como ele fica melhor. Esse conhecimento é muito importante como base para quando você for estudar os processos de fabricação mecânica. Fique ligado.

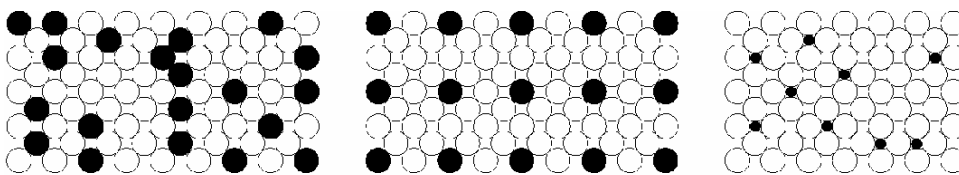
### **Aço-carbono: um campeão de popularidade**

Antes mesmo de conhecer o ferro, o homem já conhecia ao menos uma liga metálica: o bronze. Por observação, ele percebeu que a “mistura” de dois metais melhorava o desempenho do metal que estava em maior quantidade.

O que ele não sabia direito era o que acontecia lá dentro e, portanto, porque era possível misturar os metais entre si e com outros elementos de tal forma que um ficava dissolvido dentro do outro.

Como você já estudou em nossa primeira aula, esses porquês nos são ensinados pela Química e por suas leis que organizam as relações entre os átomos de cada elemento. Assim, as ligas metálicas são, na verdade, o que chamamos de uma solução sólida. Ou seja, a mistura completa dos átomos de dois ou mais elementos onde pelo menos um é metal.

Nos metais, as soluções sólidas são formadas graças à ligação entre os átomos dos metais, causada pela atração entre os íons positivos e a “nuvem eletrônica” que fica em volta dos átomos. A figura a seguir representa, esquematicamente, tipos de soluções sólidas.

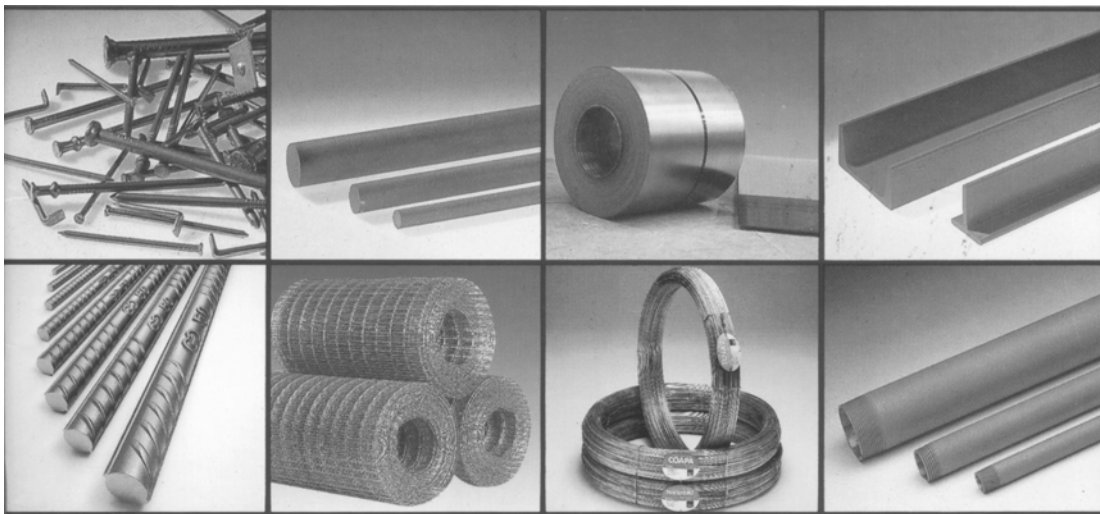


Só que, para que isso aconteça, os tamanhos e a estrutura dos átomos dos elementos de liga devem ser parecidos e ter propriedades eletroquímicas também parecidas. O cobre e o ferro, por exemplo, dissolvem muitos metais. Os átomos de carbono, por sua vez, por serem relativamente pequenos, dissolvem-se intersticial-

mente, ou seja, ocupando espaços vazios, entre os átomos do ferro.

Por isso, o aço mais comum que existe é o aço-carbono, uma liga de ferro com pequenas quantidades de carbono (máximo 2%) e elementos residuais, ou seja, elementos que ficam no material metálico após o processo de fabricação.

Dentro do aço, o carbono, juntando-se com o ferro, forma um composto chamado **carbeto de ferro** ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), uma substância muito dura. Isso dá dureza ao aço, aumentando sua resistência mecânica. Por outro lado, diminui sua ductilidade, sua resistência ao choque e à soldabilidade, e torna-o difícil de trabalhar por conformação mecânica. Esse tipo de aço constitui a mais importante categoria de materiais metálicos usada na construção de máquinas, equipamentos, estruturas, veículos e componentes dos mais diversos tipos, para os mais diferentes sistemas mecânicos.



As impurezas, como o manganês, o silício, o fósforo, o enxofre e o alumínio fazem parte das matérias-primas usadas no processo de produção do aço. Elas podem estar presentes no minério ou ser adicionadas para provocar alguma reação química desejável, como a desoxidação, por exemplo.

**Elemento de liga:** elemento, metálico ou não, que é adicionado a um metal (chamado de **metal-base**) de tal maneira que melhora alguma propriedade desse metal-base. Por exemplo, adicionando

quantidades adequadas de estanho ao cobre, obtém-se o bronze, que é mais duro que o cobre.

Por mais controlado que seja o processo de fabricação do aço, é impossível produzi-lo sem essas impurezas. E elas, de certa forma, têm influência sobre as propriedades desse material. Quando adicionadas propositalmente são consideradas **elementos de liga**, conferindo propriedades especiais ao aço. Às vezes, elas ajudam, às vezes, elas atrapalham. Assim, o que se deve fazer é controlar suas quantidades.

O **manganês** é a impureza encontrada em maior quantidade no aço (até 1,65%). Se você está mesmo ligado, deve se lembrar que, na produção do aço, ele é adicionado para auxiliar na desoxidação do metal líquido e para neutralizar o efeito nocivo do enxofre. Nesse processo, ele se combina primeiro com o enxofre e forma o sulfeto de manganês ( $MnS$ ). Isso aumenta a **forjabilidade** do aço, a **temperabilidade**, a resistência ao choque e o limite elástico. Em quantidades maiores, ele se combina com parte do carbono e forma o carbeto de manganês ( $Mn_3C$ ), que é muito duro. Isso diminui a ductilidade do aço.

Outro elemento que é adicionado ao metal líquido para auxiliar na desoxidação é o **alumínio**. Ele é usado para "acalmar" o aço, ou seja, para diminuir ou eliminar o desprendimento de gases que agitam o aço quando ele está se solidificando.

**Forjabilidade** é a capacidade do metal de ser forjado. **Temperabilidade** é a capacidade do metal de endurecer por meio de um tratamento térmico chamado **têmpera**.

O **fósforo** é um elemento cuja quantidade presente no aço deve ser controlada, principalmente, nos aços duros, com alto teor de carbono. Quando ultrapassa certos limites, ele faz o aço ficar mais duro ainda e, por isso, mais frágil a frio. Isso quer dizer que a peça de aço, com valores indesejáveis de fósforo, pode quebrar facilmente quando usada em temperatura ambiente. Um teor de fósforo em torno de 0,04% faz o aço se romper se for deformado a quente, porque forma um composto que se funde a uma temperatura muito menor ( $1.000^{\circ}C$ ) que a do ferro ( $1.500^{\circ}C$ ). Em aços

de baixo teor de carbono, por outro lado, seu efeito nocivo é menor, pois nesse caso o fósforo auxilia no aumento da dureza, e também aumenta a resistência à tração, a resistência à corrosão e a usinabilidade.

O **enxofre** é uma impureza muito difícil de ser eliminada. No aço, ele pode se combinar com o ferro e formar o sulfeto ferroso (FeS), que faz o aço se romper, com facilidade ao ser laminado, forjado ou vergado em temperaturas acima de 1.000°C. Assim, o teor máximo de enxofre permitido é de 0,05%.

Sabendo que o enxofre se combina melhor com o manganês do que com o ferro, os profissionais que entendem de metalurgia colocam no aço uma quantidade de manganês duas vezes maior do que a de enxofre, porque ele vai “preferir” se combinar com o manganês. Com isso, forma-se o sulfeto de manganês (MnS) que se solidifica em níveis de temperatura semelhantes aos do aço. Por isso, sua presença no aço não é tão nociva.

**Lingote** é uma barra de metal fundido.

O **silício** é acrescentado ao metal líquido, para auxiliar na desoxidação e impedir a formação de bolhas nos **lingotes**. Ele está presente, no aço, em teores de até 0,6%, e não tem grande influência sobre suas propriedades.

O enxofre, o manganês, o silício e o alumínio também formam, dentro do aço, compostos chamados de “inclusões não-metálicas”. Essas inclusões são partículas alongadas ou em forma de esferas muito pequenas que ficam espalhadas no meio do material metálico. O alumínio, por exemplo, combina-se com o oxigênio e forma um composto chamado **alumina** (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Quando em quantidades reduzidas, a alumina, que se apresenta sob a forma de partículas muito pequenas, afeta minimamente as propriedades do aço.

Outras inclusões não-metálicas são os silicatos, formados a partir do silício e que favorecem o aparecimento de microtrincas na estrutura do aço; e os sulfetos, formados a partir do enxofre, que

causam menor influência que os silicatos no surgimento de microtrincas.

Há ainda outros elementos, como os gases introduzidos no processo de fabricação (hidrogênio, oxigênio e nitrogênio) e os resíduos de metais provenientes das sucatas (níquel, cobre, molibdênio e cromo).

Sabendo o que a presença de cada uma dessas impurezas causa ao material, é possível, a partir de um controle de suas quantidades e do conhecimento da composição exata do aço, utilizar o material adequado ao processo de fabricação e ao tipo de peça que se quer fabricar.

Mas, se você precisa fabricar um produto que tenha aplicações especiais como, por exemplo, recipientes para a indústria química, que devem ser resistentes aos ataques de produtos químicos, certamente o aço que você usará também terá que ter características especiais. Isso é obtido com o auxílio dos tratamentos térmicos e dos elementos de liga. Os tratamentos térmicos, vamos estudar juntos, em um módulo especial. Os elementos de liga, vamos estudar na próxima parte desta lição. Aguarde.

### **Para parar e estudar**

Ufa! Desta vez você tem mesmo bastante coisa para estudar. O bom desta aula é que você pode parar, voltar e recomeçar, quantas vezes quiser. Por isso, vá com calma. Lápis e caderno na mão para as anotações e... mãos à obra!

### **Exercícios**

1. Preencha as lacunas com a alternativa que completa corretamente cada frase a seguir:
  - a) O homem descobriu que o bronze, uma mistura de .....  
....., era muito melhor do que o cobre puro.
    1. ( ) zinco e estanho;
    2. ( ) cobre e estanho;

3. ( ) cobre e zinco;
4. ( ) chumbo e cobre.
- b) A mistura completa entre dois metais ocorre graças à ligação entre os ..... dos metais.
1. ( ) neutros;
2. ( ) prótons;
3. ( ) átomos;
4. ( ) íons negativos.
- c) O que dá dureza ao aço e aumenta sua resistência mecânica é um composto chamado .....
1. ( ) sulfeto de ferro;
2. ( ) sulfeto de manganês;
3. ( ) óxido de ferro;
4. ( ) carboneto de ferro.
- d) As impurezas, como o manganês, o silício, o fósforo, o enxofre, o alumínio, fazem parte das ..... para a produção do aço.
1. ( ) estruturas cristalinas
2. ( ) matérias-primas;
3. ( ) soluções líquidas;
4. ( ) soluções sólidas.
- e) Na produção do aço, o ..... é adicionado para auxiliar na desoxidação do metal líquido.
1. ( ) fósforo;
2. ( ) enxofre;
3. ( ) carbono;
4. ( ) manganês.
- f) O que faz o aço se romper com facilidade ao ser conformado é o enxofre combinado com o..... em temperaturas acima de 1.000°C.
1. ( ) zinco;
2. ( ) ferro;
3. ( ) silício;
4. ( ) manganês.

- g) Em aços de baixo teor de carbono o .....  
.....auxilia no aumento da dureza e da resistência à tração e à corrosão.
1. ☐ manganês;
  2. ☐ fósforo;
  3. ☐ silício;
  4. ☐ estanho.
- h) O silício é acrescentado ao metal líquido para auxiliar na ..... e impedir a formação de bolhas nos lingotes.
1. ☐ oxidação;
  2. ☐ usinabilidade;
  3. ☐ desoxidação;
  4. ☐ corrosão.
- i) No processo de desoxidação do metal líquido, o manganês se combina primeiro com o enxofre e forma o ..... .
1. ☐ óxido de manganês;
  2. ☐ carbonato de manganês
  3. ☐ sulfeto de manganês;
  4. ☐ hidrato de manganês.
- j) Os silicatos são inclusões não-metálicas formadas a partir do silício e que favorecem o aparecimento de .....  
..... na estrutura do aço.
1. ☐ bolhas;
  2. ☐ partículas oxidantes;
  3. ☐ corrosão;
  4. ☐ microtrincas.

### **O que usar para melhorar?**

Na verdade, você tem três possibilidades para melhorar a resistência mecânica de qualquer metal: aplicar processos de fabricação por conformação mecânica, como prensagem e laminação, por exemplo; pode, também, tratar o metal termicamente, ou seja,



submetê-lo a aquecimento e resfriamento sob condições controladas. Ou acrescentar elementos de liga. Tudo isso vai mexer com a estrutura do metal-base, de acordo com o que já estudamos na lição sobre as propriedades dos materiais.

Por exemplo, o aço-carbono com baixo teor de carbono (até 0,25%), que constitui cerca de 90% da produção total de aço, pode ter sua resistência mecânica aumentada pelo processamento mecânico a frio. O aço de teor médio (até 0,5%), para a produção de peças forjadas, carcaças de caldeiras, ferramentas agrícolas etc., pode ter sua resistência mecânica aumentada por meio de tratamento térmico.

Então, quando o aço é um aço-liga? Quando as quantidades dos elementos adicionados são muito maiores do que as encontradas nos aços-carbono comuns. E quando essa adição ajuda o aço na modificação e melhoria de suas propriedades mecânicas.

Dependendo da quantidade dos elementos de liga adicionados, o aço-liga pode ser um aço de baixa liga, se tiver até 5% de elementos de adição, ou um aço 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. Lembrando que é possível adicionar mais de um elemento de liga para obter um aço-liga, e sem nos determos muito nos detalhes do que acontece com a micro-estrutura desse material, vamos dizer o que cada um desses elementos traz ao aço, em termos de mudança de propriedades.

E, para tornar o estudo mais fácil para você, colocamos essas informações no quadro da próxima página.

Estudando o quadro, dá para perceber que os elementos de liga, em geral, alteram a velocidade das transformações que ocorrem dentro da estrutura do aço, quando ele está esfriando e passando do estado líquido para o estado sólido. Essas alterações das microestruturas modificam a capacidade do material de passar

por um tratamento térmico chamado **têmpera**. Esse tratamento, por sua vez, define a maior resistência e tenacidade do aço. Assim, nos aços-ligas, as propriedades mecânicas são melhoradas por meio de tratamento térmico para endurecimento.

Bem, nesta aula, tentamos dar a você uma noção básica sobre os elementos que estão dentro do aço e o que essa presença faz com o comportamento desse material, durante a fabricação e o uso da peça. O assunto não está, nem de longe, esgotado. Seria muito legal se você não parasse por aqui e procurasse ler mais sobre ele. Vá à biblioteca do seu bairro e dê uma “sapeada”. Você vai descobrir um mundo de informações novas que o tornarão um profissional dos bons!

<b>Elemento de liga</b>	<b>Influência na estrutura</b>	<b>Influências nas propriedades</b>	<b>Aplicações</b>	<b>Produtos</b>
<b>Níquel</b>	Refina o grão. Diminui a velocidade de transformação na estrutura do aço.	Aumento da resistência à tração.  Alta ductilidade.	Aço para construção mecânica. Aço inoxidável. Aço resistente a altas temperaturas.	Peças para automóveis. Utensílios domésticos. Caixas para tratamento térmico.
<b>Manganês</b>	Estabiliza os carbonetos. Ajuda a criar microestrutura dura por meio de têmpera. Diminui a velocidade de resfriamento.	Aumento da resistência mecânica e temperabilidade da peça. Resistência ao choque.	Aço para construção mecânica.	Peças para automóveis e peças para uso geral engenharia mecânica.
<b>Cromo</b>	Forma carbonetos. Acelera o crescimento dos grãos.	Aumento da resistência à corrosão e à oxidação. Aumento da resistência a altas temperaturas.	Aços para construção mecânica. Aços-ferramenta. Aços inoxidáveis.	Produtos para indústria química; talheres; válvulas e peças para fornos. Ferramentas de corte.
<b>Molibdênio</b>	Influência na estabilização do carboneto.	Alta dureza ao rubro. Aumento de resistência à tração. Aumento de temperabilidade.	Aços-ferramenta. Aço-cromo-níquel. Substituto do tungstênio em aços rápidos.	Ferramentas de corte.
<b>Vanádio</b>	Inibe o crescimento dos grãos. Forma carbonetos.	Maior resistência mecânica. Maior tenacidade e temperabilidade. Resistência à fadiga e à abrasão.	Aços cromo-vanádio	Ferramentas de corte.
<b>Tungstênio</b>	Forma carbonetos muito duros. Diminui a velocidade das transformações. Inibe o crescimento dos grãos.	Aumento da dureza. Aumento da resistência a altas temperaturas.	Aços rápidos.  Aços-ferramenta	Ferramentas de corte.

<b>Cobalto</b>	Forma carbonetos (fracamente).	Aumento da dureza. Resistência à tração. Resistência à corrosão e à erosão.	Aços rápidos. Elemento de liga em aços magnéticos.	Lâminas de turbina de motores a jato.
<b>Silício</b>	Auxilia na desoxidação. Auxilia na grafitação. Aumenta a fluidez.	Aumento da resistência à oxidação em temperaturas elevadas. Melhora da temperabilidade e da resistência à tração.	Aços com alto teor de carbono. Aços para fundição em areia.	Peças fundidas.

### Para parar e estudar

Você está cansado? Então, dê uma parada mesmo. Vá até a cozinha, tome um café ou um suco e depois volte, para reler a última parte da aula e fazer os exercícios.

### Exercícios

2. Resolva as seguintes questões:

- a) Escreva com suas palavras, como é possível melhorar a resistência mecânica de um metal.
- b) Quando um aço é um aço-liga?
- c) O que a adição de elementos de liga traz ao aço?
- d) Quais os elementos de liga mais comumente adicionados ao aço?
- e) Qual a diferença entre um aço de baixa liga e um aço especial?
- f) Em que momento ocorrem as modificações na estrutura do aço e que lhe dão características especiais?
- g) O que a têmpera confere ao aço?

### Avalie o que você aprendeu

Será que você pode ir adiante? O teste, a seguir, vai lhe dizer sim ou não.

3. Associe os elementos listados na coluna A com as características ou aplicações propostas na coluna B.

Coluna A	Coluna B
a) ( ) manganês	1. Elemento usado para diminuir ou eliminar o desprendimento de gases que agitam o aço, quando ele está se solidificando.
b) ( ) Alumínio	2. Elemento cuja quantidade deve ser controlada, principalmente nos aços duros, com alto teor de carbono.
c) ( ) Enxofre	3. Elemento que é acrescentado ao metal líquido, para auxiliar na desoxidação e para impedir a formação de bolhas nos lingotes.
d) ( ) Silício	4. Impureza encontrada em maior quantidade no aço, ela é adicionada para auxiliar na desoxidação do metal líquido.
e) ( ) Fósforo	5. No aço, ele pode se combinar com o ferro e formar o sulfeto ferroso (FeS), que faz o aço se romper com facilidade ao ser laminado, forjado ou vergado, em temperaturas acima de 1.000°C.

#### Gabarito

1. a) Cobre e estanho.  
b) Átomos.  
c) Carboneto de ferro.  
d) Matérias-primas.  
e) Manganês.  
f) Ferro.  
g) Fósforo.  
h) Desoxidação.  
i) Sulfeto de manganês.  
j) Microtrincas.

2. a) Por meio do tratamento térmico e de outros recursos, com alterações na estrutura física, como por exemplo: laminação, forjamento, prensagem e pela adição de elementos de liga.
- b) Quando as quantidades dos elementos adicionados são muito maiores do que as encontradas nos aços-carbono comuns.
- c) Modificação e melhoria de suas propriedades mecânicas.
- d) Níquel, manganês, cromo, molibdênio, vanádio, tungstênio, cobalto, silício e cobre.
- e) Baixa liga, até 5% de elementos de adição e o aço especial, se tiver quantidades de elementos de liga acima de 5%.
- f) Por ocasião do tratamento térmico e pela adição de elementos de liga.
- g) Maior resistência e tenacidade.
3. a) 4
- b) 1
- c) 5
- d) 3
- e) 2