

## INDICIE

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>2</b>
<b>2. ESTRUTURA CRISTALINA DOS MATERIAIS</b>	<b>13</b>
<b>3. DIAGRAMAS DE FASES</b>	<b>23</b>
<b>4. O SISTEMA FERRO-CARBONO</b>	<b>37</b>
<b>5. AÇOS E FERROS FUNDIDOS</b>	<b>48</b>
<b>6. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS METAIS</b>	<b>63</b>
<b>7. TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS</b>	<b>76</b>
<b>8. CORROSÃO DE METAIS</b>	<b>96</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Perspectiva Histórica

Os materiais estão provavelmente mais entranhados na nossa cultura do que a maioria de nós percebe. Nos transportes, habitação, vestiário, comunicação, recreação e produção de alimentos; virtualmente todos os seguimentos de nossa vida diária são influenciados em maior ou menor grau pelos materiais.

Historicamente, o desenvolvimento e o avanço das sociedades têm estado intimamente ligados às habilidades dos seus membros em produzir e manipular os materiais para satisfazer as suas necessidades. De fato, as civilizações antigas foram designadas de acordo com o seu nível de desenvolvimento em relação aos materiais (Idade da Pedra, Idade do Bronze).

Os primeiros seres humanos tiveram acesso a apenas um número limitado de materiais, aqueles presentes na natureza: pedra, madeira, argila, peles, e assim por diante. Com o tempo, esses primeiros seres humanos descobriram técnicas para a produção de materiais com propriedades superiores àquelas dos materiais naturais; esses novos materiais incluíram as cerâmicas e vários metais. Além disso, foi descoberto que as propriedades de um material podiam ser alteradas por meio de tratamentos térmicos e pela adição de outras substâncias. Naquele ponto, a utilização dos materiais era um processo totalmente seletivo, isto é, consistia em decidir dentre um conjunto específico e relativamente limitado de materiais aquele que mais se adequava a uma dada aplicação, em virtude de suas características.

Não foi senão em tempos relativamente recentes que os cientistas compreenderam as relações entre os elementos estruturais dos materiais e suas propriedades. Esses conhecimentos deram-lhes condições para moldar em grande parte as características dos materiais. Assim, dezenas de milhares de materiais diferentes foram desenvolvidos, com características relativamente específicas e que atendem as necessidades da nossa moderna e complexa sociedade; esses materiais incluem metais, plásticos, vidros e fibras.

O desenvolvimento de muitas tecnologias que tornam nossa existência tão confortável está intimamente associado ao acesso a materiais adequados. Um avanço na compreensão de um tipo de material é com frequência o precursor para o progresso escalado de uma tecnologia. Por exemplo, o automóvel não teria sido possível não fosse pela disponibilidade a baixo custo de aço ou de algum

outro material substituto comparável. Em nossos tempos, dispositivos eletrônicos sofisticados dependem de componentes que são feitos a partir dos chamados materiais semicondutores.

## 1.2 Ciência e Engenharia de Materiais

A disciplina *ciência de materiais* envolve a investigação das relações entre as estruturas e as propriedades dos materiais. Em contraste, a *engenharia de materiais* consiste, com base nessas correlações estrutura-propriedade, no projeto ou na engenharia da estrutura de material para produzir um conjunto de propriedades predeterminadas. Assim, devemos ter atenção para as relações ente as propriedades dos materiais e os elementos de estrutura.

**Estrutura** de um material se refere, em geral, ao arranjo dos seus componentes internos. A estrutura subatômica envolve os elétrons no interior dos átomos individuais e as interações com os seus núcleos. Em nível atômico, a estrutura engloba a organização dos átomos ou das moléculas umas em relação às outras. O próximo grande reino estrutural que contém grandes grupos de átomos normalmente conglomerados é chamado de “microscópico”, significando aquele que está sujeito a uma observação direta através de algum tipo de microscópio. Finalmente, os elementos estruturais que podem ser vistos a olho nu são chamados de “macroscópico”.

**Propriedade.** Consiste em uma peculiaridade de um dado material em termos do tipo e da intensidade da sua resposta a um estímulo específico que lhe é imposto. Virtualmente todas as propriedades dos materiais sólidos podem ser agrupadas em seis categorias diferentes:

- 1 – Mecânica;
- 2 – Elétrica;
- 3 – Térmica;
- 4 - Magnética;
- 5 – Óptica;
- 6 – Deteriorativa.

Para cada uma existe um tipo característico de estímulo capaz de causar diferentes respostas. As propriedades mecânicas relacionam a deformação à aplicação de uma carga ou força; são exemplos o módulo de elasticidade e a resistência. Para as propriedades elétricas, tais como a condutividade elétrica e a constante dielétrica, o estímulo é um campo elétrico. O comportamento térmico dos sólidos pode ser representado em termos da capacidade calorífica e da condutividade térmica. As propriedades magnéticas demonstram à resposta de um material a aplicação de um campo magnético. Para as propriedades ópticas, o estímulo é a radiação eletromagnética ou luminosa; o índice de refração e a refletividade representam bem as propriedades ópticas. Finalmente, as características deteriorativas indicam a reatividade química dos materiais.

Além da estrutura e das propriedades, dois outros componentes importantes estão envolvidos na ciência e na engenharia de materiais, quais sejam, o “processamento” e o “desempenho”.

Com respeito às relações entre esses quatro componentes; estrutura, propriedades, processamento e desempenho, a estrutura de um material irá depender da maneira como ele será processado. Além disso, o desempenho de um material será uma função das suas propriedades. Assim a inter-relação entre processamento, estrutura, propriedades e desempenho é linear, como é mostrado na ilustração da figura 1.1



Fig.1.1 – Os quatro componentes da disciplina Tecnologia dos Materiais e o seu inter relacionamento linear.

### 1.3 Por que estudar a Ciência e Engenharia de Materiais?

Muitos cientistas e engenheiros de aplicações sejam eles das áreas de mecânica, civil, química ou elétrica, irão uma vez ou outra se deparar com um problema de projeto que envolve materiais. Os exemplos podem incluir uma engrenagem de transmissão, a superestrutura para um edifício, um componente para uma refinaria de petróleo, ou um *chip* de circuito integrado.

Obviamente, os cientistas e engenheiros de materiais são especialistas totalmente envolvidos na investigação e no projeto de materiais.

Muitas vezes, um problema de materiais consiste na seleção do material correto dentre muitos milhares de materiais disponíveis. Existem vários critérios em relação aos qual a decisão final normalmente se baseia. Em primeiro lugar, as condições de serviço devem ser caracterizadas, uma vez que essas irão ditar as propriedades que o material deve possuir. Em apenas raras ocasiões um material possui a combinação máxima ou ideal de propriedades para uma dada aplicação. Dessa forma, pode ser necessário abrir mão de uma característica por outra. O exemplo clássico envolve a resistência e a ductilidade; normalmente, um material que possui uma alta resistência terá apenas uma ductilidade limitada. Em tais casos, pode ser necessária uma conciliação razoável entre duas ou mais propriedades.

Uma segunda consideração de seleção é qualquer deterioração das propriedades dos materiais que possa ocorrer durante operação em serviço. Por exemplo, reduções significativas na resistência mecânica podem resultar da exposição a temperaturas elevadas ou ambientes corrosivos. Finalmente, muito provavelmente a consideração final estará relacionada a fatores econômicos; Quanto irá custar o produto final acabado? Pode ser o caso de encontrar um material com o conjunto ideal de propriedades, mas seu preço ser proibitivo. Novamente, será inevitável alguma conciliação. O custo de uma peça acabada também inclui as despesas que incidiram durante o processo de fabricação para a obtenção da forma desejada.

Por isso, quanto mais familiarizado estiverem técnicos, engenheiros e cientistas com as várias características e relações estrutura-propriedade, assim como as técnicas de processamento dos materiais, mais capacitado e confiante ele estará para fazer escolhas ponderadas de materiais com base nesses critérios.

## 1.4 Classificação dos materiais

Os materiais sólidos foram agrupados convenientemente de acordo com três classificações básicas: metais, cerâmicas e polímeros. Este esquema está baseado principalmente na composição química e na estrutura atômica, e a maioria dos materiais se enquadra dentro de um ou de outro

grupo distinto, embora existam alguns materiais intermediários. Além disso, existem três outros grupos de materiais de engenharia importantes, os compósitos, os semicondutores e os biomateriais.

Vejamos uma explicação sucinta dos diferentes tipos de materiais e as características que os representam.

## **Metais**

Os materiais metálicos consistem normalmente em combinações de elementos metálicos. Eles possuem um grande número de elétrons não-localizados; isto é, esses elétrons não estão ligados a qualquer átomo em particular. Muitas das propriedades dos metais são atribuídas diretamente a esses elétrons. Os metais são condutores de eletricidade e calor extremamente bons, e não são transparentes a luz visível; uma superfície metálica polida possui uma aparência brilhosa. Além disso, os metais são muito resistentes, ao mesmo tempo em que são deformáveis, o que é responsável pelo seu amplo uso em aplicações estruturais.

## **Cerâmicas**

As cerâmicas são compostos formados entre elementos metálicos e elementos não-metálicos; na maioria das vezes elas são compostas por óxidos, nitretos e carbetos. A grande variedade de materiais que se enquadra nessa classificação inclui as cerâmicas compostas por minerais argilosos, o cimento e o vidro. Tipicamente, esses materiais são isolantes a passagem de eletricidade e calor, e são mais resistentes a altas temperaturas e ambientes severos do que os metais e os polímeros. Em relação ao seu comportamento mecânico, as cerâmicas são duras, porém são muito frágeis e quebradiças.

## **Polímeros**

Os polímeros incluem os materiais comuns de plástico e borracha que conhecemos. Muitos deles são compostos orgânicos que têm sua química baseada no carbono, no hidrogênio e em outros elementos não-metálicos; além disso, eles possuem estruturas moleculares muito grandes. Tipicamente, esses materiais possuem baixas densidades e podem ser extremamente flexíveis.

## **Compósitos**

Os materiais compósitos consistem em combinações de dois ou mais materiais diferentes. Um grande tipo de materiais compósitos tem sido engenheirado. A fibra de vidro é um exemplo familiar, onde fibras de vidro são incorporadas no interior de um material polimérico. Um compósito é projetado para exibir uma combinação das melhores características de cada um dos materiais componentes. Assim, a fibra de vidro adquire a resistência do vidro e a flexibilidade do polímero. Muitos dos desenvolvimentos recentes na área de materiais têm envolvido materiais compósitos.

## **Semicondutores**

Os semicondutores são utilizados em função das suas características elétricas peculiares, possuem propriedades elétricas intermediárias entre aquelas exibidas pelos condutores elétricos e os isolantes. Além disso, as características elétricas desses materiais são extremamente sensíveis à presença de minúsculas concentrações de átomos de impurezas cujas concentrações podem ser controladas dentro de regiões do espaço muito pequenas. Os semicondutores tornaram possível o advento dos circuitos integrados, que revolucionaram totalmente as indústrias de produtos eletrônicos e computadores (para não mencionar a nossa vida) ao longo das duas últimas décadas.

## Biomateriais

Os biomateriais são empregados nos componentes implantados no interior do corpo humano para substituição de partes do corpo doentes ou danificadas. Esses materiais não devem produzir substâncias tóxicas e devem ser compatíveis com os tecidos do corpo (não devem causar reações biológicas adversas). Todos os materiais citados: metais, cerâmicas, polímeros, compósitos e semicondutores, podem ser usados como biomateriais.

### 1.5 Materiais Avançados

Os materiais utilizados em aplicações de alta tecnologia são algumas vezes chamados de *materiais avançados*. Por alta tecnologia subentendemos um dispositivo ou produto que opera ou que funciona utilizando princípios relativamente intrincados e sofisticados; os exemplos incluem os equipamentos eletrônicos, computadores, sistema de fibra ótica, espaçonaves, aeronaves e foguetes militares. Esses materiais avançados consistem tipicamente em materiais tradicionais cujas propriedades foram aprimoradas ou em materiais de alto desempenho desenvolvidos recentemente. Além disso, eles podem ser de todos os tipos de materiais, e são em geral relativamente caros.

### 1.6 Materiais do Futuro

#### Materiais Inteligentes

Os *materiais inteligentes* consistem em um grupo de materiais novos e de última geração que estão atualmente sendo desenvolvidos e que terão influência significativa sobre muitas das nossas tecnologias. O adjetivo “inteligente” implica que esses materiais são capazes de sentir



mudanças nos seus ambientes e então responder a essas mudanças de uma maneira predeterminada, como também ocorre com os organismos vivos.

Os componentes de um material (ou sistema) inteligente incluem algum tipo de sensor (que detecta um sinal de entrada), e um atuador (que executa uma função de resposta e adaptação). Os atuadores podem ser chamados para mudar a forma, a posição, a frequência natural ou as características mecânicas em resposta as mudanças de temperatura, campos elétricos, e/ou campos magnéticos.

## **Nanotecnologia**

Até tempos muito recentes, o procedimento geral utilizado pelos cientistas para compreender a química e a física dos materiais era partir do estudo de estruturas grandes e complexas e então investigar os blocos construtivos fundamentais que compõem essas estruturas, que são menores e mais simples. Essa abordagem é algumas vezes chamada de ciência “de cima para baixo”. Contudo, com o advento dos microscópios de ponta de prova, que permitem a observação dos átomos e das moléculas individuais, ficou possível manipular e mover átomos e moléculas e formar novas estruturas, dessa forma desenhando novos materiais fabricados a partir de constituintes que são simples ao nível atômico (isto é, construir “materiais por projeto”). Essa habilidade em se arranjar cuidadosamente os átomos proporciona oportunidades para o desenvolvimento de propriedades mecânicas, elétricas, magnéticas e de outras naturezas que não seriam possíveis de qualquer outra maneira. A isso chamamos de abordagem “de baixo para cima”; o estudo das propriedades desses materiais é conhecido por “nanotecnologia”, onde o prefixo “nano” indica que as dimensões dessas entidades estruturais são da ordem do nanômetro ( $10^{-9}\text{m}$ ) – como regra, inferiores a 100 nanômetros (o equivalente a aproximadamente 500 diâmetros atômicos). Um exemplo de material desse tipo é o nanotubo de carbono.

Em futuro próximo, vamos sem dúvida alguma descobrir que um número cada vez maior dos nossos avanços tecnológicos fará uso desses materiais nanoengenheirados.

## 1.7 Necessidades dos Materiais Modernos

Apesar do tremendo progresso que tem sido obtido ao longo dos últimos anos na disciplina de Ciências e Engenharia de Materiais, ainda existem desafios tecnológicos, incluindo o desenvolvimento de materiais cada vez mais sofisticados e especializados, assim como a consideração do impacto ambiental causado pela produção dos materiais. Assim sendo, torna-se apropriado abordar estas questões, a fim de tornar mais clara essa perspectiva.

A energia nuclear guarda alguma promessa, mas as soluções para os muitos problemas que ainda permanecem irão envolver necessariamente os materiais, desde combustíveis até estruturas de contenção, até as instalações para o descarte dos rejeitos radioativos.

Quantidades significativas de energia estão envolvidas na área de transportes. A redução no peso dos veículos de transportes (automóveis, aeronaves, trens, etc.), assim como o aumento das temperaturas da operação dos motores, irá melhorar a eficiência dos combustíveis. Novos materiais estruturais de alta resistência e baixa densidade ainda precisam ser desenvolvidos, assim como materiais com recursos para trabalhar em temperaturas mais elevadas, a serem usados nos componentes dos motores.

Além disso, existe uma necessidade reconhecida de se encontrar fontes de energia novas e econômicas, além de se usar as fontes de energia atuais de uma maneira mais eficiente. Os materiais irão, sem dúvida alguma, desempenhar um papel importante nesses desenvolvimentos. Por exemplo, a conversão direta de energia solar em energia elétrica foi demonstrada. As células solares empregam alguns materiais que são de certa forma complexas e caras. Para assegurar uma tecnologia viável, devem ser desenvolvidos materiais altamente eficientes nesses processos de conversão, porém que sejam mais baratos que os atuais.

Ademais, a qualidade do meio ambiente depende da nossa habilidade em controlar a poluição do ar e da água. As técnicas de controle de poluição empregam vários materiais. Além disso, o processamento de materiais e os métodos de refino precisam ser aprimorados, de modo que eles produzam degradação menor do meio ambiente, isto é, menos poluição e menor destruição da paisagem pela mineração das matérias primas. Ainda, em alguns processos de fabricação de materiais, são produzidas substâncias tóxicas, e o impacto ecológico causado pela eliminação dessas substâncias deve ser considerado.

Muitos materiais que usamos são derivados de recursos não renováveis, isto é, recursos que não são possíveis de ser regenerados. Dentre estes materiais estão incluídos os polímeros, para os quais a matéria prima principal é o petróleo, e alguns metais. Esses recursos não renováveis estão se tornando gradualmente escassos, o que exige:

- 1) A descoberta de reservas adicionais;
- 2) O desenvolvimento de novos materiais que possuam propriedades comparáveis, mas que apresentem um impacto ambiental menos adverso;
- 3) Maiores esforços de reciclagem e o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem.

Como uma consequência dos aspectos econômicos não somente da produção, mas também do impacto ambiental e de fatores ecológicos, está tornando cada vez mais importante considerar o ciclo de vida “desde o berço até o túmulo” dos materiais em relação ao seu processo global de fabricação.

## EXERCÍCIOS

- 1ª) Como podem ser alteradas as propriedades dos materiais?
- 2ª) A que se refere a estrutura dos materiais?
- 3ª) Como podem ser agrupadas as propriedades dos materiais sólidos?
- 4ª) Para cada uma das propriedades dos materiais metálicos, relacione um estímulo e sua resposta.
- 5ª) De acordo com suas classificações básicas, como foram classificados os materiais sólidos?
- 6ª) Quais os três grupos de materiais sólidos de engenharia?
- 7ª) Relacione três características de cada material metálico.

8ª) Em que consiste os materiais inteligentes?

## 2. ESTRUTURA CRISTALINA DOS MATERIAIS

### 2.1 Introdução

Neste capítulo será discutida a estrutura dos materiais, especificamente a de alguns dos arranjos que podem ser assumidos pelos átomos no estado sólido.

Dentro desse contexto, são introduzidos os conceitos de cristalinidade e não-cristalinidade.

Para os sólidos cristalinos, a noção de estrutura cristalina é apresentada, especificada em termos de célula unitária. As estruturas cristalinas encontradas tanto nos metais como nas cerâmicas são então detalhadas, juntamente com o esquema através do qual os pontos, as direções e os planos cristalográficos são expressos. São considerados os materiais monocristais, policristalinos e não-cristalinos.

### ESTRUTURAS CRISTALINA

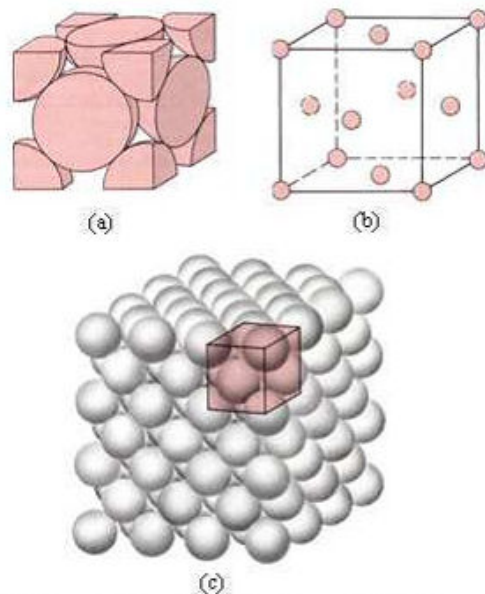
### 2.2 Conceitos Fundamentais

Os materiais sólidos podem ser classificados de acordo com a regularidade segundo a qual seus átomos ou íons estão arranjos uns em relação aos outros. Um material cristalino é aquele em que os átomos estão situados de acordo com uma matriz que se repete, ou que é periódica, ao longo de grandes distâncias atômicas; isto é, existe ordem de longo alcance, tal que, quando ocorre um processo de solidificação, os átomos se posicionam de acordo com um padrão tridimensional repetitivo, onde cada átomo está ligado aos seus átomos vizinhos mais próximos. Todos os metais, muitos materiais cerâmicos e certos polímeros formam estruturas cristalinas sob condições normais de solidificação.

Aqueles materiais que não se cristalizam, essa ordem atômica de longo alcance está ausente; esses materiais são chamados de não-cristalinos ou amorfos.

Algumas das propriedades dos sólidos cristalinos dependem da estrutura cristalina do material, ou seja, da maneira segundo a qual os átomos, íons ou moléculas estão arranjados no espaço. Existe um número extremamente grande de estruturas cristalinas diferentes, todas elas possuindo uma ordenação atômica de longo alcance; essas variam desde estruturas relativamente simples, como ocorre para os metais, até estruturas excessivamente complexas, como as que são exibidas por alguns materiais cerâmicos e poliméricos. Este capítulo trata de algumas estruturas cristalinas usuais encontradas em metais e cerâmicas.

Ao descrever as estruturas cristalinas, os átomos (ou íons) são considerados como se fossem esferas sólidas com diâmetros bem definidos. Isso é conhecido por modelo da esfera rígida atômica, no qual as esferas que representam os átomos vizinhos mais próximos tocam umas nas outras. Um exemplo do modelo de esferas rígidas para o arranjo atômico encontrado em alguns metais elementares comuns está mostrado na figura 2.1c. Nesse caso em particular, todos os átomos são idênticos. Algumas vezes o termo rede cristalina é utilizado no contexto de estruturas cristalinas; nesse sentido, “rede cristalina” significa uma matriz tridimensional de pontos que coincidem com posições dos átomos (ou centros de esferas).



**Íons:** são átomos que, por um motivo qualquer, perderam ou ganharam elétrons. Quando um átomo perde elétrons se torna um *ion positivo* ou *cátion*, passando a ter excesso de cargas positivas. Contrariamente, ao ganhar elétrons, torna-se um *ion negativo* ou *ânion*. Os átomos dos elementos químicos tendem a estabilizar a última camada ganhando ou perdendo elétrons, ou seja, para a maioria há necessidade de se transformar em íons. Por exemplo, átomos de metais, como o cobre, tendem a perder elétrons (ions cátion) e átomos de ametais, como o oxigênio, tendem a ganhar elétrons (ions ânion).

Fig.2.1- Para a estrutura cristalina de faces centradas: (a) uma representação da célula unitária por meio de esferas rígidas; (b) uma célula unitária com esferas reduzidas e (c) um agregado de muitos átomos.

### 2.3 Células Unitárias

A ordenação dos átomos nos sólidos cristalinos indica que pequenos grupos de átomos formam um padrão repetitivo. Dessa forma, ao descrever as estruturas cristalinas, freqüentemente se torna conveniente subdividir a estrutura em pequenas entidades repetitivas, chamadas de **células unitárias**. Para a maioria das estruturas cristalinas, as células unitárias consistem em paralelepípedos ou prismas com três conjuntos de faces paralelas; uma dessas células unitárias está desenhada no agregado de esferas (Fig. 2.1c), e nesse caso ela tem o formato de um cubo. Uma célula unitária é escolhida para representar a simetria da estrutura cristalina, onde todas as posições de átomos no cristal podem ser geradas através de translações das distâncias integrais da célula unitária ao longo de cada uma das suas arestas. Assim sendo a célula unitária consiste na unidade estrutural básica ou bloco construtivo básico da estrutura cristalina e define a estrutura cristalina em virtude da sua geometria e das posições dos átomos no seu interior. Em geral a conveniência dita que os vértices do paralelepípedo devem coincidir com os centros dos átomos representados como esferas rígidas. Além disso, mais do que uma única célula unitária pode ser escolhida para uma

estrutura cristalina particular; contudo, em geral usamos a célula unitária com o mais alto grau de simetria geométrica.

## 2.4 Estruturas Cristalina dos Metais

A ligação nesse grupo de material é metálica, e dessa forma sua natureza é não direcional. Conseqüentemente, não existem restrições em relação à quantidade e à posição dos átomos vizinhos mais próximos; isso leva a números relativamente elevados de vizinhos mais próximos, assim como a empacotamentos compactos dos átomos na maioria das estruturas cristalinas dos metais. Além disso, no caso dos metais, ao se utilizar o modelo de esferas rígidas para representar as estruturas cristalinas, cada esfera representa um núcleo iônico.

Existem três estruturas cristalinas relativamente simples para a maioria dos metais mais comuns, são elas:

1. Cúbica de Faces Centradas (CFC);
2. Cúbica de Corpo Centrado (CCC);
3. Hexagonal Compacta (HC).

### A Estrutura Cristalina Cúbica de Faces Centradas

A estrutura cristalina encontrada em muitos metais possui uma célula unitária com geometria cúbica, com os átomos localizados em cada um dos vértices e nos centros de todas as faces do cubo. Essa estrutura é adequadamente chamada de estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC). Alguns dos metais mais familiares que possuem essa estrutura cristalina são o cobre, o alumínio, a prata e o ouro. A figura 2.1a mostra um modelo de esferas rígidas para a célula unitária CFC, enquanto na figura 2.1b os centros dos átomos estão representados por com o objetivo de proporcionar uma melhor perspectiva dos átomos. O agregado de átomos na figura 2.1c



representa uma seção de um cristal que consiste em muitas células unitárias CFC. Essas esferas ou núcleos iônicos se tocam umas as outras ao longo de uma diagonal da face; o comprimento da aresta do cubo  $a$  e o raio atômico  $R$  estão relacionados através da expressão:

$$a = 2R\sqrt{2} \quad (2.1)$$

Na estrutura CFC, cada átomo em um vértice é compartilhado por oito células unitárias, enquanto um átomo localizado no centro de uma face pertence a apenas duas células. Portanto, um oitavo de cada um dos oito átomos em vértices, ou um total de quatro átomos inteiros, pode ser atribuído a uma dada célula unitária. Isso está mostrado na figura 2.1a, onde estão representadas apenas as frações das esferas que estão dentro dos limites do cubo. A célula unitária compreende o volume do cubo que é gerado a partir dos centros dos átomos nos vértices, como mostrado na figura.

As posições nos vértices e nas faces são na realidade equivalentes; isto é, uma translação do vértice do cubo de um átomo originalmente em um vértice para o centro de um átomo localizado em uma das faces não irá alterar a estrutura da célula unitária.

Duas outras características importantes de uma estrutura cristalina são o número de coordenação e o Fator de Empacotamento Atômico (FEA). Nos metais, todos os átomos possuem o mesmo número de vizinhos mais próximos ou átomos em contato, o que constitui o seu número de coordenação. No caso das estruturas cristalinas cúbicas de faces centradas, o número de coordenação é 12. Isso pode ser confirmado através de um exame da figura 2.1a, o átomo na face anterior possui como vizinhos mais próximos quatro átomos que estão localizados nos vértices ao seu redor, quatro átomos que estão localizados nas faces que estão em contato pelo lado de trás, e quatro outros átomos de faces equivalentes na próxima célula unitária, à sua frente, os quais não estão representados na figura.

O FEA representa a fração do volume de uma célula unitária que corresponde às esferas sólidas, assumindo o modelo das esferas atômicas rígidas, ou:

$$FEA = \frac{\text{volume dos átomos em uma célula unitária}}{\text{volume total das esferas}} \quad (2.2)$$

Para a estrutura CFC, o fator de empacotamento atômico é de 0,74, o qual consiste no máximo empacotamento possível para um conjunto de esferas onde todas as esferas possuem o mesmo diâmetro. Tipicamente, os metais possuem fatores de empacotamento atômico relativamente elevados, a fim de maximizar a proteção conferida pelo gás de elétrons livres.

### **A Estrutura Cristalina Cúbica de Corpo Centrado**

Uma estrutura cristalina metálica comumente encontrada também possui uma célula unitária cúbica, com átomos localizados em todos os oito vértices e um único outro átomo localizado no centro do cubo. Essa estrutura é conhecida por estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Um conjunto de esferas demonstrando essa estrutura cristalina está mostrado na figura 2.2c, enquanto as figuras 2.2a e 2.2b representam diagramas de células unitárias CCC onde os átomos estão representados de acordo com os modelos de esferas reduzidas, respectivamente. Os átomos no centro e nos vértices se tocam uns nos outros ao longo das diagonais do cubo, e o comprimento da célula unitária  $a$  e o raio atômico  $R$  estão relacionados através da expressão:

$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

O cromo, o ferro e o tungstênio, assim como diversos outros metais, exibem uma estrutura cristalina do tipo CCC.

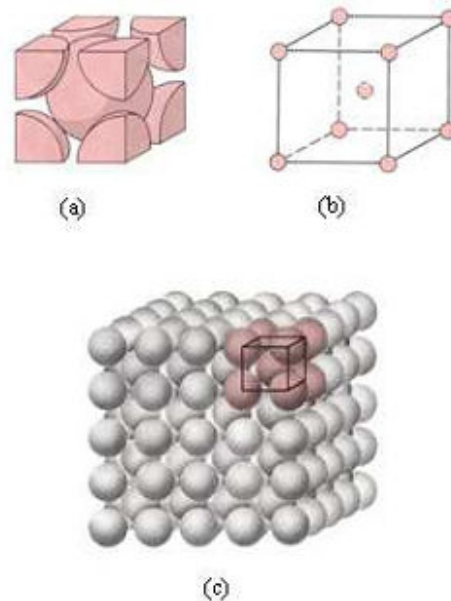


Fig. 2.2 - Para a estrutura cristalina de corpo centrado, (a) uma representação da célula unitária por meio de esferas rígidas, (b) uma célula unitária com esferas reduzidas, e (c) um agregado de muitos átomos.

Dois átomos estão associados a cada célula unitária CCC: o equivalente a um átomo, distribuído entre os oito vértices do cubo, onde cada átomo em um vértice é compartilhado por oito células unitárias, e o único átomo no centro do cubo, o qual está totalmente contido dentro da sua célula. Além disso, as posições atômicas central e no vértice são equivalentes. O número de coordenação para a estrutura cristalina CCC é 8; cada átomo central possui os oito átomos localizados nos vértices do cubo como seus vizinhos mais próximos. Uma vez que o número de coordenação é menor na estrutura CCC do que na estrutura CFC, o fator de empacotamento atômico na estrutura CCC também é menor do que na CFC, sendo de 0,68, contra 0,74 na CFC.

### **A Estrutura Cristalina Hexagonal Compacta**

Nem todos os metais possuem células unitárias com simetria cúbica; a última estrutura cristalina comumente encontrada nos metais que será vista aqui possui uma célula unitária com formato hexagonal. A figura 2.3a mostra uma célula unitária com esferas reduzidas para essa

estrutura, que é conhecida por hexagonal compacta (HC); uma construção composta por várias células unitária HC está representada a figura 2.3b.

As faces superior e inferior da célula unitária são compostas por seis átomos que formam hexágonos regulares e que se encontram ao redor de um único átomo central. Outro plano que contribui com três átomos adicionais para a célula unitária está localizado entre os planos superior e inferior. Os átomos localizados nesse plano intermediário possuem como vizinhos mais próximos átomos em ambos os planos adjacentes. O equivalente a seis átomos está contido em cada célula unitária; um sexto de cada um dos 12 átomos localizados nos vértices das faces superior e inferior, metade de cada um dos dois átomos no centro das faces superior e inferior, e todos os três átomos interiores que compõe o plano intermediário. Se  $a$  e  $c$  representam, respectivamente, as dimensões menor e maior da célula unitária na figura 2.2a, a razão  $c/a$  deve ser de 1,633; contudo, no caso de alguns metais que apresentam a estrutura cristalina HC, essa razão apresenta um desvio em relação ao valor ideal.

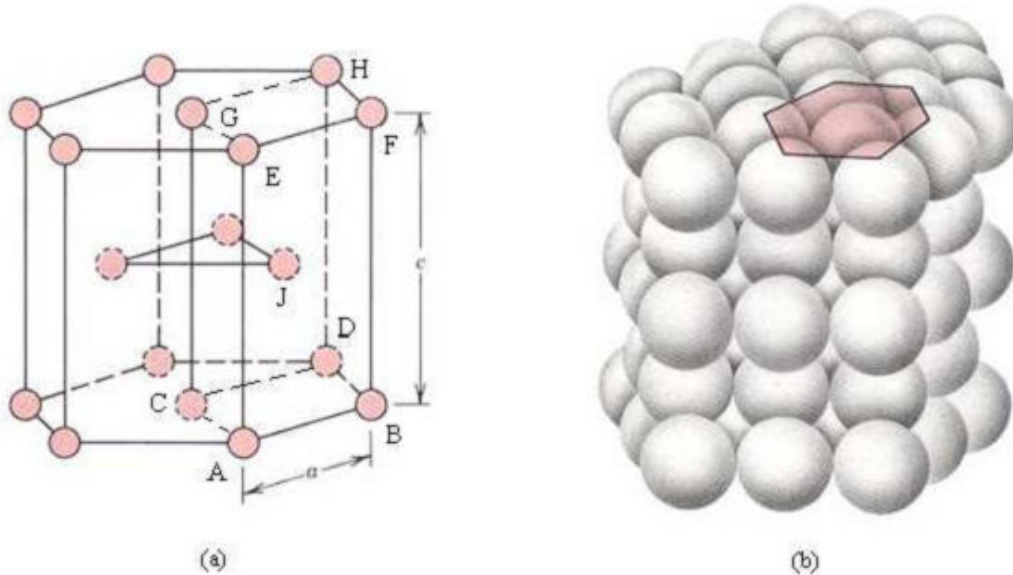


Fig. 2.3 - Para a estrutura cristalina hexagonal compacta: (a) uma célula unitária com esferas reduzidas ( $a$  e  $c$  representam os comprimentos das arestas menor e maior respectivamente), e (b) um agregado de muitos átomos.

O número de coordenação e o fator de empacotamento atômico para a estrutura cristalina HC são os mesmos que para a estrutura cristalina CFC, ou seja: 12 e 0,74, respectivamente. Os metais HC são o cádmio, o magnésio, o titânio e o zinco.

## 2.5 Cálculos da Densidade - Metais

Um conhecimento da estrutura cristalina de um sólido metálico permite o cálculo da sua densidade teórica,  $\rho$ , que é obtida através da seguinte relação:

$$\rho = \frac{nA}{V_c N_A} \quad (2.4)$$

Onde:

$n$  = número de átomos associados a cada célula unitária;

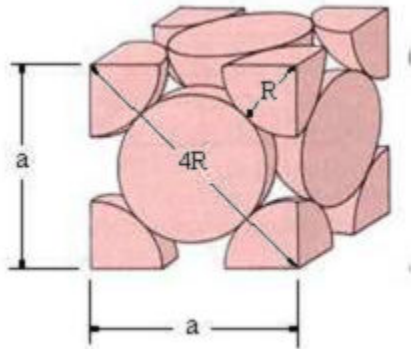
$A$  = peso atômico;

$V_c$  = volume da célula unitária;

$N_A$  = número de Avogrado ( $6,023 \times 10^{23}$  átomos/mol).

## EXERCÍCIOS

- 1) Calcular o volume de uma célula unitária CFC em termos do raio atômico  $R$ .



- 2) Mostrar que o fator de empacotamento atômico para a estrutura cristalina CFC é de 0,74.
- 3) O cobre possui um raio atômico de 0,128 nm, uma estrutura cristalina CFC, e um peso atômico de 63,5g/mol. Calcular sua densidade teórica e comparar a resposta com sua densidade medida experimentalmente (8,94g/cm<sup>3</sup>).

## 3. DIAGRAMAS DE FASES

### 3.1 Introdução

A compreensão dos diagramas de fases para sistemas de ligas é extremamente importante, pois existe uma forte correlação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas, e o desenvolvimento da microestrutura de uma liga está relacionado às características do seu diagrama de fases. Os diagramas de fases fornecem informações valiosas sobre os fenômenos da fusão, fundição, cristalização e outros.

### DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS

**Componente:** os componentes são metais puros e/ou os compostos que compõem uma liga. Por exemplo: em um latão cobre-zinco, os componentes são Cu e Zn.

**Solvente:** elemento ou composto que está presente em maior quantidade; ocasionalmente os átomos de solvente também são chamados de átomos hospedeiros.

**Soluto:** é usado para indicar um elemento ou composto que está em menor concentração.

**Sistema:** possui dois significados:

1 – pode se referir a um corpo específico do material que está sendo considerado; por exemplo: uma panela de fundição com aço fundido.

2 – pode estar relacionado à série de possíveis ligas compostas pelos mesmos componentes, porém de maneira independente da composição da liga; por exemplo: o sistema ferro-carbono.

**Solução sólida:** uma formação sólida se forma quando, à medida que os átomos de soluto são adicionados ao material hospedeiro, a estrutura cristalina é mantida e nenhuma nova estrutura é

formada. Vejamos uma analogia com uma solução líquida: se dois líquidos solúveis um no outro (tais com a água e o álcool) forem combinados, será produzida uma solução líquida à medida que as moléculas de ambos forem se misturando, e a composição se manterá homogênea ao longo de toda a extensão de líquido resultante. Uma solução sólida também é homogênea em termos de composição; os átomos de impureza estão distribuídos aleatoriamente no interior do sólido.

## 3.2 Limite de Solubilidade

Para muitos sistemas de ligas e em uma dada temperatura específica, existe uma concentração máxima de átomos de soluto que pode se dissolver no solvente para formar uma solução sólida; a isto, chamamos de limite de solubilidade. A adição de soluto em excesso, além desse limite de solubilidade, resulta na formação de uma outra solução sólida ou de um outro composto que possui uma composição marcadamente diferente.

Vejamos como exemplo o sistema açúcar-água ( $C_{12}H_{22}O_{11}-H_2O$ ). Inicialmente, quando o açúcar é adicionado a água, forma-se uma solução ou xarope açúcar-água. À medida que mais açúcar é introduzido, a solução se torna mais concentrada, até que o limite de solubilidade é atingido, quando então a solução fica saturada com açúcar. Nesse instante, a solução não é capaz de dissolver qualquer quantidade adicional de açúcar, e as adições subseqüentes simplesmente sedimentam no fundo do recipiente. Dessa forma, o sistema consiste agora em duas substâncias separadas: uma solução líquida de xarope açúcar-água e cristais sólidos de açúcar que não foram dissolvidos.

## 3.3 Fases

Uma fase pode ser definida como uma porção homogênea de um sistema que possui características físicas e químicas uniformes. Todo material puro é considerado uma fase. Da mesma forma, assim o são todas as soluções sólidas, líquidas e gasosas. Por exemplo, a solução de xarope açúcar-água, discutida, consiste em uma fase, enquanto o açúcar sólido consiste em uma outra fase.



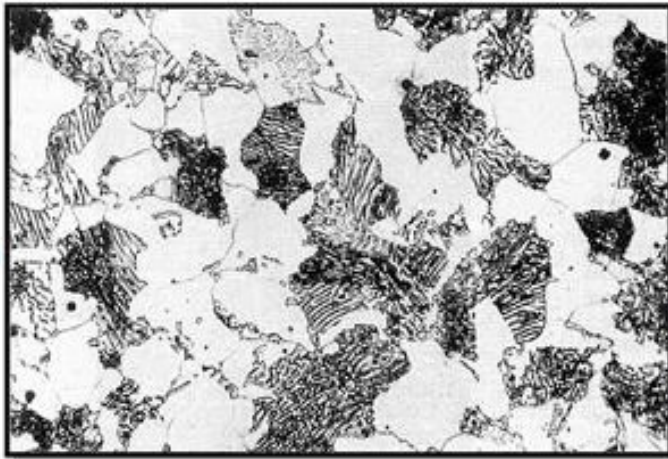
Cada uma dessas fases possui propriedades físicas diferentes (uma é um líquido a outra é um sólido); além disso, cada fase é quimicamente diferente (isto é, possui uma composição química diferente); uma consiste virtualmente em açúcar puro, a outra consiste em uma solução de  $H_2O$  e  $C_{12}H_{22}O_{11}$ . Se mais de uma fase estiver presente em um dado sistema, cada fase terá suas próprias propriedades individuais, e existirá uma fronteira separando as fases através da qual existirá uma mudança descontínua e abrupta nas características físicas e/ou químicas. Quando duas fases estão presentes em um sistema, não é necessário que existam diferenças tanto nas propriedades físicas como nas propriedades químicas; uma disparidade em um ou noutro conjunto de propriedades já é suficiente. Quando água e gelo estão presentes em um recipiente, existem duas fases separadas; elas são fisicamente diferentes (uma é um sólido, a outra um líquido), porém ambas são idênticas em constituição química. Além disso, quando uma substância pode existir em duas ou mais formas polimórficas (por exemplo, quando possui tanto estrutura CFC como CCC), cada uma dessas estruturas consiste em uma fase separada, pois suas respectivas características físicas são diferentes.

### 3.4 Microestrutura

Muitas vezes, as propriedades físicas e, em particular, o comportamento mecânico de um material, dependem da microestrutura. A microestrutura está sujeita a uma boa observação direta através de um microscópio, utilizando-se microscópio óptico ou eletrônico. Nas ligas metálicas, a microestrutura é caracterizada pelo número de fases presentes, por suas proporções e pela maneira segundo a qual elas estão distribuídas ou arranjadas. A microestrutura de uma liga depende de variáveis tais como os elementos de liga que estão presentes, suas concentrações e o tratamento térmico a que a liga foi submetida (isto é, a temperatura, o tempo de aquecimento à temperatura do tratamento e a taxa de resfriamento até a temperatura ambiente).

Normalmente, preparos de superfície cuidadosos e meticulosos são necessários para revelar os detalhes importantes de microestruturas. A superfície da amostra deve ser primeiro lixada e polida, até atingir um acabamento liso e espelhado. Isso é conseguido utilizando-se papéis e pós sucessivamente mais finos. A microestrutura é revelada mediante a aplicação de um tratamento de superfície que emprega um reagente químico apropriado, em um procedimento conhecido por ataque químico, após este ataque, as diferentes fases podem ser distinguidas pelas suas aparências.

Por exemplo, no caso de uma liga bifásica, uma fase pode aparecer clara, enquanto a outra fase aparece escura, como é o caso para a figura 3.1.



Aço hipoeutetóide com 0,38%pC. Os grãos claros são compostos por ferrita pró-eutetóide, enquanto os grãos lamelares são compostos por perlita. As camadas escuras e claras na perlita correspondem, respectivamente, às fases cementita e ferrita.

Fig. 3.1 - Micrografia eletrônica de um aço hipoeutetóide com 0,38%pC.

Quando somente uma única fase ou uma única solução sólida está presente a textura é uniforme, exceto pelos contornos dos grãos que podem estar revelados, como é mostrado na figura 3.2.

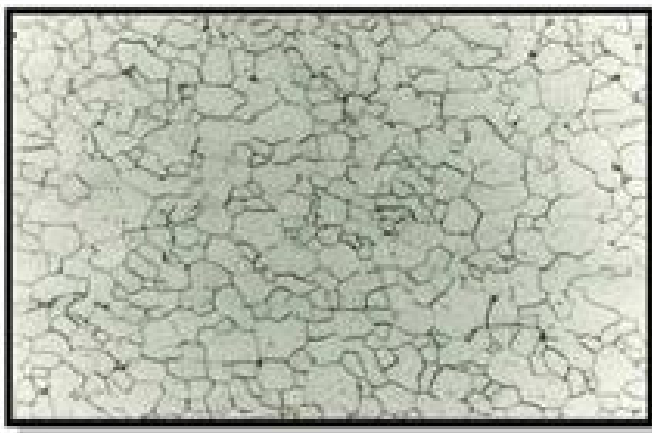


Fig. 3.2 - Fotomicrografia de uma amostra de uma liga ferro-cromo policristalina polida e atacada quimicamente, onde os contornos de grãos aparecem escuros.

## 3.5 Equilíbrio de Fases

Equilíbrio é outro conceito essencial. Este pode ser mais bem descrito em termos de uma grandeza termodinâmica conhecida como energia livre. Sucintamente, a energia livre é uma função da energia interna de um sistema e também da aleatoriedade ou desordem dos átomos ou moléculas (entropia). Um sistema está em equilíbrio quando sua energia livre se encontra em um valor mínimo para uma combinação específica de temperatura, pressão e composição. Em um sentido macroscópico, isto significa que as características do sistema não mudam ao longo do tempo, mas persistem indefinidamente; isto é, o sistema é estável. Uma alteração na pressão, na temperatura e/ou na composição de um sistema em equilíbrio irá resultar em um aumento na energia livre e em uma possível mudança espontânea para outro estado onde a energia livre seja reduzida.

A expressão equilíbrio de fases, usada com frequência no contexto dessa discussão, refere-se ao equilíbrio na medida em que esse se aplica a sistemas onde pode existir mais do que uma única fase. O equilíbrio de fases se reflete em uma constância nas características das fases de um sistema ao longo do tempo. Vejamos um exemplo, a fim de ilustrar melhor este conceito.

Suponha que um xarope açúcar-água esteja contido no interior de um vasilhame fechado e que a solução esteja em contato com açúcar no estado sólido à temperatura de 20°C. Se o sistema se encontra em equilíbrio, a composição do xarope será de 65%p  $C_{12}H_{22}O_{11}$ -35%p  $H_2O$ , e as quantidades e composições do xarope e do açúcar sólido irão permanecer constantes ao longo do tempo. Se a temperatura do sistema for aumentada repentinamente, vamos dizer, até 100°C, esse equilíbrio ficará temporariamente perturbado, no sentido de que o limite de solubilidade foi aumentado para 80%p  $C_{12}H_{22}O_{11}$ . Dessa forma, uma parte do açúcar sólido irá se transferir para a solução, no xarope. Esse fenômeno prosseguirá até que a nova concentração de equilíbrio do xarope seja estabelecida à temperatura mais alta.

Esse exemplo açúcar-xarope ilustrou o princípio do equilíbrio de fases usando um sistema líquido-sólido. Em muitos sistemas metalúrgicos e de materiais de interesse, o equilíbrio de fases envolve apenas fases sólidas. Nesse sentido, o estado do sistema se reflete nas características da microestrutura, a qual necessariamente inclui não apenas as fases presentes e suas composições, mas, além disso, as quantidades relativas das fases e seus arranjos ou distribuições espaciais.

## DIAGRAMAS DE FASES EM CONDIÇÕES DE EQUILÍBRIO

Muitas das informações sobre o controle da microestrutura ou da estrutura das fases de um sistema de ligas específico são mostradas de uma maneira conveniente e concisa no que é chamado de diagrama de fases, com freqüência também denominado diagrama de equilíbrio ou diagrama constitucional. Muitas microestruturas se desenvolvem a partir das transformações de fases, que são as mudanças que ocorrem entre as fases quando a temperatura é modificada (ordinariamente, através de um processo de resfriamento). Isso pode envolver a transição de uma fase para outra, ou o aparecimento ou desaparecimento de uma fase.

Os diagramas de fases são úteis para prever as transformações de fases e as microestruturas resultantes, que podem apresentar uma natureza de equilíbrio ou de ausência de equilíbrio. Os diagramas de equilíbrio representam as relações existentes entre a temperatura e as composições, e as quantidades de cada fase em condições de equilíbrio. Existem diversos tipos de diagramas diferentes; contudo, apenas a temperatura e a composição, são os parâmetros para ligas binárias, assunto de nosso estudo. Uma liga binária é uma liga que contém dois componentes. Se mais de dois componentes estiverem presentes, os diagramas de fases se tornam extremamente complicados e difíceis de serem representados. Os princípios empregados para o controle da microestrutura com auxílio de diagramas de fases podem ser ilustrados através de ligas binárias, mesmo que, na realidade, a maioria das ligas contenha mais do que apenas dois componentes.

### 3.6 Sistemas Isomorfos Binários

Possivelmente, o tipo de diagrama de fases binário mais fácil de ser compreendido e interpretado é aquele caracterizado pelo sistema cobre-níquel figura 3.3.

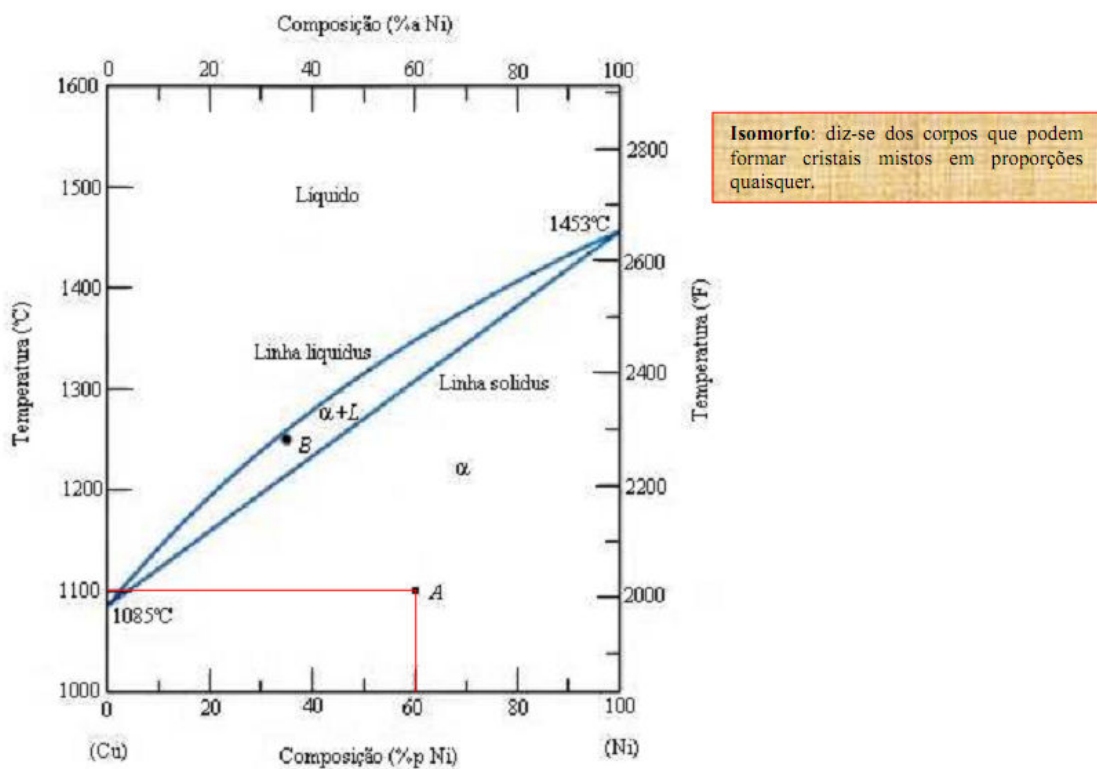


Fig. 3.3 – O diagrama de fases cobre-níquel

A temperatura é traçada ao longo da ordenada; enquanto a abscissa representa a composição da liga, em porcentagem de peso na escala inferior e porcentagem atômica na escala superior, de níquel.

A composição varia de 0%p Ni (100%p Cu) na extremidade horizontal esquerda e 100%p Ni (0%p Cu) na outra extremidade, à direita.

Três regiões, ou campos, de fases diferentes aparecem no diagrama, um campo alfa ( $\alpha$ ), um campo líquido (L), e um campo bifásico  $\alpha + L$ .

Cada região é definida pela fase ou pelas fases que existem ao longo das faixas de temperaturas e de composições que estão delimitadas pelas curvas de fronteira entre as fases.

O líquido L consiste em uma solução líquida homogênea, composta tanto por cobre quanto por níquel. A fase  $\alpha$  consiste em uma solução sólida substitucional que contém átomos tanto de Cu quanto de Ni e que possui uma estrutura cristalina CFC.

A temperaturas abaixo de aproximadamente 1080°C, o cobre e o níquel são mutuamente solúveis no estado sólido para toda e qualquer combinação de composições. Essa solubilidade completa é explicada pelo fato de que tanto o Cu como o Ni possuem a mesma estrutura cristalina (CFC), raios atômicos e eletronegatividades praticamente idênticos, e valências semelhantes.

O sistema cobre-níquel é chamado de isomorfo devido a esta completa solubilidade dos dois componentes nos estados líquido e sólido.

Para as ligas metálicas, as soluções sólidas são designadas usualmente por meio de letras gregas minúsculas ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  etc.). Além disso, em relação às fronteiras entre as fases, a linha que separa os campos das fases L e  $\alpha + L$  é chamada de linha liquidus, como está mostrado na figura 3.3; a fase líquida está presente em todas as temperaturas e composições localizadas acima desta linha.

A linha solidus está localizada entre as regiões  $\alpha$  e  $\alpha + L$ , e abaixo dela existe somente a fase sólida  $\alpha$ .

As linhas solidus e liquidus se interceptam nas duas extremidades de composição; esses pontos correspondem às temperaturas de fusão dos componentes puros. Por exemplo, as temperaturas de fusão do cobre puro e do níquel puro são, respectivamente, 1085°C e 1453°C. O aquecimento do cobre puro corresponde a um movimento vertical, para cima, ao longo do eixo da temperatura pelo lado esquerdo. O cobre permanece no estado sólido até a sua temperatura de fusão ser atingida. A transformação do estado sólido para o estado líquido ocorre na temperatura de fusão, e nenhum aquecimento adicional é possível até que essa transformação tenha sido completa.

Para qualquer composição que não a de componentes puros, esse fenômeno de fusão irá ocorrer ao longo de uma faixa de temperaturas entre as linhas solidus e liquidus; as duas fases, sólido  $\alpha$  e líquido L, estarão presentes em equilíbrio dentro dessa faixa de temperaturas.

Por exemplo: ao se aquecer uma liga com composição de 60%p Ni-40%p Cu, figura 3.3, a fusão tem início a uma temperatura de aproximadamente 1280°C (2340°F); a quantidade da fase líquida aumenta continuamente com elevação da temperatura até aproximadamente 1320°C (2410°C), quando a liga fica completamente líquida.

## 3.7 Interpretação de diagramas de fases

Para um sistema binário com composição e temperatura conhecidas e que se encontra em um estado de equilíbrio, pelo menos três tipos de informações estão disponíveis:

- 1 – as fases que estão presentes;
- 2 – as composições dessas fases;
- 3 – as porcentagens ou frações das fases.

Os procedimentos para efetuar essas determinações serão demonstrados usando o sistema cobre-níquel.

### Fases Presentes

O estabelecimento de quais fases presentes é relativamente simples. Tudo o que precisa ser feito é localizar o ponto temperatura-composição de interesse no diagrama de fase e observar com qual(is) fase(s) o campo de fases correspondente está identificado. Por exemplo, uma liga com composição de 60%p Ni-40%p Cu à temperatura de 1100°C estaria localizada no ponto A da figura 3.3; uma vez que este ponto se encontra dentro da região  $\alpha$ , apenas a fase  $\alpha$  estará presente. Por outro lado, uma liga com composição de 35%p Ni-65%p Cu à temperatura de 1250°C, ponto B, consistirá, em condições de equilíbrio, tanto na fase  $\alpha$  como na fase líquida.

### Determinação das composições das Fases

A primeira etapa na determinação das composições das fases (em termos das concentrações dos componentes) consiste em se localizar o ponto temperatura-composição correspondente no diagrama de fases. Métodos diferentes são usados para as regiões monofásicas e



bifásicas. Se apenas uma fase está presente, o procedimento é simples, a composição dessa fase é simplesmente a mesma que a composição global da liga. Por exemplo, considere uma liga com 60%p Ni-40%p Cu à temperatura de 1100°C, ponto A da figura 3.3. Nessa combinação de composição e temperatura, somente a fase  $\alpha$  está presente, e esta possui uma composição 60%p Ni-40%p Cu.

Para uma liga com uma combinação de composição e temperatura localizada em uma região bifásica, a situação é mais complicada. Em todas as regiões bifásicas, e somente nas regiões bifásicas, pode ser imaginada a existência de uma série de linhas horizontais, uma para cada temperatura diferente. Cada uma dessas linhas é conhecida como linha de amarração, ou algumas vezes como isoterma. Essas linhas de amarração se estendem através da região bifásica. Para calcular as concentrações das duas fases em condição de equilíbrio, deve-se seguir o seguinte procedimento:

1 – Uma linha de amarração é construída através da região bifásica na temperatura em que a liga se encontra;

2 – São anotadas as interseções da linha de amarração com as fronteiras entre as fases em ambas;

3 – São traçadas linhas perpendiculares à linha de amarração, a partir dessas interseções, até o eixo horizontal das composições, onde pode ser lida a composição de cada uma das respectivas fases.

Por exemplo, vamos considerar novamente a liga com composição de 35%p Ni-65%p Cu à temperatura de 1250°C, localizada no ponto B na figura 3.4, que se encontra dentro da região  $\alpha + L$ .

Dessa forma, o problema consiste em se determinar a composição (em termos de %Ni e %Cu) tanto para a fase  $\alpha$  quanto para a fase líquida.

A linha de amarração foi construída através da região contendo as fases  $\alpha + L$  (líquido), como mostrado na figura 3.4. A linha perpendicular traçada a partir da interseção da linha de amarração com a fronteira liquidus se encontra com o eixo das composições em 31,5%p Ni-68,5%p Cu, que corresponde à composição da fase líquida, CL.



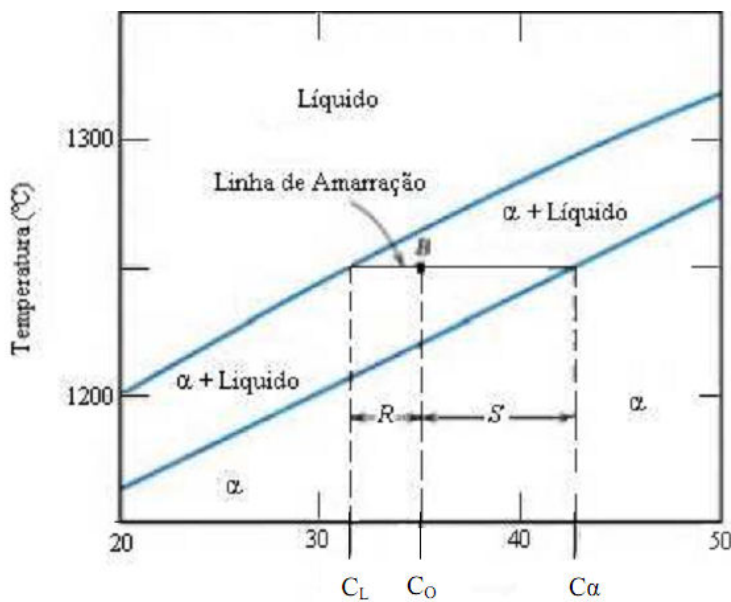


Fig. 3.4 – Uma fração do diagrama de fases cobre-níquel para o qual as composições e as quantidades das fases estão determinadas para o ponto B.

De maneira semelhante, para a interseção da linha de amarração com a linha solidus, encontramos uma composição para a fase composta pela solução sólida  $\alpha$ ,  $C_\alpha$ , de 42,5%p Ni-57,5%p Cu.

### Determinação das Quantidades das Fases

As quantidades relativas (como fração ou como porcentagem) das fases presentes em condições de equilíbrio também podem ser calculadas com auxílio dos diagramas de fases. Novamente, os casos monofásicos e bifásicos devem ser tratados separadamente. A solução para uma região monofásica é óbvia. Uma vez que apenas uma fase está presente, a liga é composta integralmente por aquela fase, isto é, a fração da fase é 1,0 ou, de outra forma, a porcentagem é de 100%. A partir do exemplo anterior para a liga com 60%p Ni-40%p Cu à temperatura de 1100°C (ponto A da figura 3.3), somente a fase  $\alpha$  está presente; portanto, a liga é composta totalmente ou em 100% pela fase  $\alpha$ .

Se a posição para a combinação de composição e temperatura estiver localizada dentro de uma região bifásica, a complexidade será maior. A linha de amarração será utilizada em conjunto com um procedimento conhecido freqüentemente como regra da alavanca (ou regra da alavanca inversa), o qual é aplicado da seguinte maneira:

1 – a linha da amarração é construída através da região bifásica na temperatura da liga.

2 – a composição global da liga é localizada sobre a linha de amarração.

3 – a fração de uma fase é calculada tomando-se o comprimento da linha de amarração desde a composição global da liga até a fronteira entre fases com a outra fase e dividindo-se esse valor pelo comprimento total da linha de amarração.

4 – a fração da outra fase é determinada de maneira semelhante.

5 – se forem desejadas as porcentagens das fases, a fração de cada fase deve ser multiplicada por 100.

No emprego da regra da alavanca, os comprimentos dos segmentos da linha de amarração podem ser determinados ou pela medição direta no diagrama de fases, usando-se uma régua com escala linear, de preferência graduada com milímetros, ou mediante a subtração das composições conforme a leitura das mesmas no eixo das composições.

Vamos considerar novamente o exemplo mostrado na figura 3.3, onde a temperatura de 1250°C ambas as fases,  $\alpha$  e líquida, estão presentes para uma liga com composição 35%p Ni-65%p Cu. O problema consiste em calcular a fração de cada uma das fases,  $\alpha$  e líquido. A linha de amarração que foi usada para a determinação das composições das fases  $\alpha$  e L foi construída. A composição global da liga é localizada ao longo da linha de amarração e está representada como CO, enquanto as frações mássicas estão representadas como WL e  $W_\alpha$  para as respectivas fases L e  $\alpha$ .

A partir da regra da alavanca, o valor de WL pode ser calculado de acordo com a expressão:

$$W_L = \frac{S}{R+S}$$

ou pela subtração das composições,

$$W_L = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L}$$

Para uma liga binária, a composição precisa ser especificada em termos de apenas um dos seus componentes constituintes; para o cálculo acima, será usada a porcentagem a porcentagem em peso de níquel (isto é,  $C_0 = 35\% \text{p Ni}$ ,  $C_\alpha = 42,5\% \text{p Ni}$  e  $C_L = 31,5\% \text{p Ni}$ ), e:

$$W_L = \frac{42,5 - 35}{42,5 - 31,5} = 0,68$$

De maneira semelhante, para a fase  $\alpha$ ,

$$W_\alpha = \frac{R}{R+S}$$

$$\frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L}$$

$$\frac{35 - 31,5}{42,5 - 31,5} = 0,32$$

Obviamente são obtidas respostas idênticas quando são usadas composições expressas em termos da porcentagem em peso de cobre em vez de porcentagem em peso de níquel.

Dessa forma, para uma liga binária, a regra da alavanca pode ser empregada para determinar as quantidades ou as frações relativas das fases em qualquer região bifásica, desde que a temperatura e a composição sejam conhecidas e que tenha sido estabelecida uma condição de equilíbrio.

É fácil confundir os procedimentos anteriores para a determinação das composições das fases e das quantidades fracionárias das fases; dessa forma é apropriado fazer um breve resumo.

As composições das fases são expressas em termos das porcentagens em peso dos componentes (por exemplo, %p Cu, %p Ni). Para qualquer liga que consista em uma única fase, a composição dessa fase é a mesma que a composição global da liga. Se duas fases estiverem presentes, deve ser empregada uma linha de amarração, cujas extremidades determinam as composições das respectivas fases. Em relação às quantidades fracionárias das fases (por exemplo, a fração mássica da fase  $\alpha$  ou da fase líquida) quando existe uma única fase, a liga é composta totalmente por essa fase. Por outro lado, no caso de uma liga bifásica, deve ser utilizada a regra da alavanca, onde é tomada a razão entre os comprimentos dos segmentos da linha de amarração.

## EXERCÍCIOS

- 1) Uma liga cobre-níquel com composição de 70%p Ni-30%p Cu é aquecida a partir de uma temperatura de 1300°C (2379°F)
  - a. A qual temperatura se forma a primeira fração de fase líquida?
  - b. Qual a composição dessa fase líquida?
  - c. A qual temperatura ocorre a fusão completa da liga?
  - d. Qual é a composição da última fração de sólido que permanece no meio antes da fusão completa?

## 4. O SISTEMA FERRO-CARBONO

### 4.1 Introdução

De todos os sistemas de ligas binárias, a que possivelmente seja a mais importante é o sistema ferro e carbono. Tanto os aços quanto os ferros-fundidos, principais materiais estruturais em todas as culturas tecnologicamente avançadas, são essencialmente ligas ferro-carbono. Esta seção é devotada ao estudo do diagrama de fases para este sistema e o desenvolvimento de várias possíveis microestruturas.

### 4.2 O Diagrama de Fases Ferro-Carbono(Fe-Fe<sub>3</sub>C)

Uma parte do diagrama de fase ferro-carbono está apresentada na Figura 4.1. O ferro puro, no aquecimento, experimenta duas mudanças em sua estrutura cristalina antes de se fundir. À temperatura ambiente em sua forma estável, chamada ferrita ou ferro  $\alpha$ , possui uma estrutura cristalina CCC. A ferrita experimenta uma transformação, após aquecimento, mudando de fase, de ferrita ( $\alpha$ ) para austenita ( $\gamma$ ) CFC, ou ferro  $\gamma$ , a 912°C. Esta austenita persiste até 1394°C, temperatura na qual a austenita CFC se reverte de volta para a fase CCC conhecida como ferrita ( $\delta$ ), que finalmente se funde a 1538°C. Todas estas mudanças são visíveis ao longo do eixo vertical esquerdo do diagrama de fases.

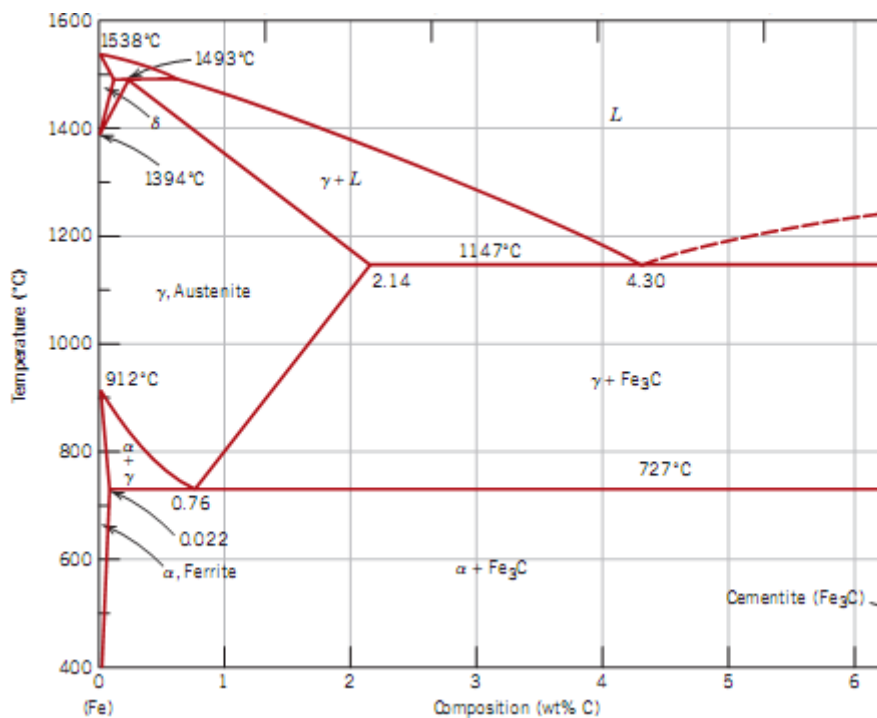


Fig. 4.1 – Diagrama Ferro carbono

O eixo de composição na Figura 4.1 se estende apenas até 6,70%C, em peso; nesta concentração o composto intermediário carboneto de ferro (ou carbeto de ferro), ou cementita ( $Fe_3C$ ), é formada, sendo ela representada por uma linha vertical no diagrama de fases. Assim o sistema ferro-carbono pode ser dividido em 2 partes: uma porção rica em ferro, como mostrado na Fig. 4.1 e a outra (não mostrada) para composições entre 6,70%C e 100%C em peso (grafita pura). Na prática, todos os aços e ferros-fundidos têm teores de carbono menores do que 6,70%C, em peso; portanto, nós consideramos apenas o sistema ferro-carboneto de ferro.

A austenita, ou a fase  $\gamma$  do ferro, quando em liga justamente com o carbono, não é estável abaixo de 727°C, como indicado na Fig. 4.1. Como demonstrado nas discussões que se seguem, transformações de fase envolvendo austenita são muito importantes no tratamento térmico dos aços. Fig. 4.2 mostra duas micrografias, uma da fase ferrita ( $\alpha$ ) outra da fase austenita ( $\gamma$ ).

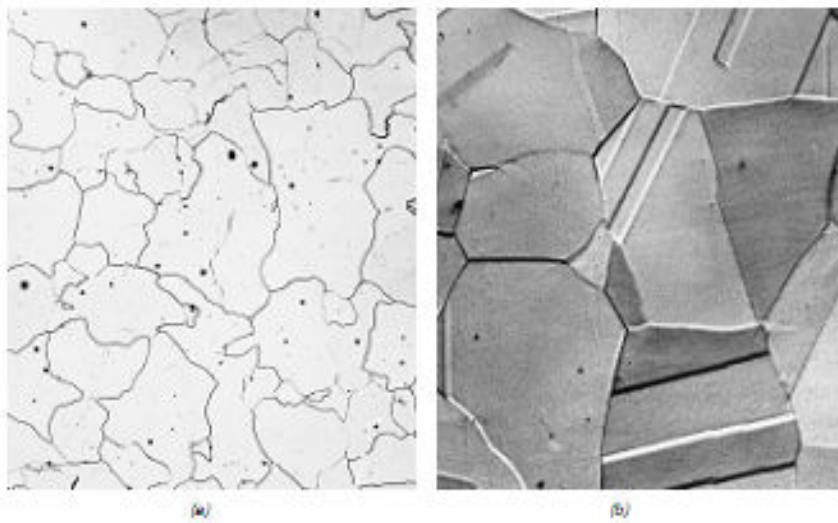
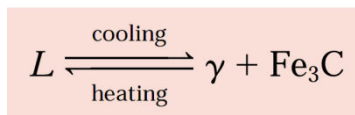


Fig.4.2 – Microestruturas do aço

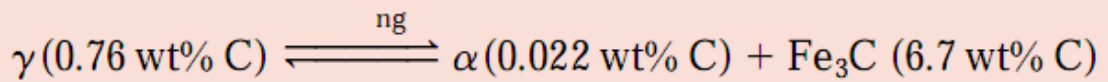
A cementita ( $Fe_3C$ ) se forma quando o limite de solubilidade de carbono no ferro  $\alpha$  é excedido a uma temperatura abaixo de  $727^\circ C$ . Como indicado na Fig. 4.1,  $Fe_3C$  também coexistirá com a fase  $\delta$  entre  $727$  e  $1148^\circ C$ . Mecanicamente cementita é muito dura e frágil; a resistência de alguns aços é grandemente melhorada pela sua presença.

As regiões bifásicas estão expostas na Fig. 4.1. Pode-se notar que existe uma transformação de uma fase líquida em duas fases sólidas, reação esta titulada de Reação Eutética para o sistema ferro-carboneto de ferro, em  $4,30\%C$  e  $1148^\circ C$ . Segue a Reação:



Onde, através do resfriamento a fase líquida (L) se transforma em duas fases sólidas, a austenita ( $\gamma$ ) e a cementita ( $Fe_3C$ ), pode-se notar que com o aquecimento, temos a reação inversa.

Pode-se também notar a existência de outra transformação de fase, onde uma fase sólida se transforma em duas fases outras fases sólidas, reação titulada de Reação Eutetóide para o sistema ferro-carbono numa composição de  $0,77\%C$ , em peso, e numa temperatura de  $727^\circ C$ . Esta reação eutetóide pode ser representada por:



Onde, através do resfriamento a fase sólida ( $\gamma$ ) se transforma em duas outras fases sólidas, a ferrita ( $\alpha$ ) e a cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), pode-se notar que com o aquecimento, temos a reação inversa, chamada de autenitização do aço, esta transformação é muito importante e é discutida de forma mais profunda em capítulos posteriores.

Ligas ferrosas são aquelas nas quais ferro é o principal componente, mas o carbono bem como outros elementos de liga podem estar presentes. No esquema de classificação de ligas ferrosas baseadas em teor de carbono, existem 3 tipos: ferro, aço e ferro fundido. Ferro comercialmente puro contém menos do que 0,008%C, em peso, e, a partir do diagrama de fases, é composto quase que exclusivamente de fase ferrita à temperatura ambiente. As ligas ferro-carbono que contém entre 0,008 e 2,11%C, em peso, são classificadas como aços. Na maioria dos aços a microestrutura consiste das fases tanto  $\alpha$  quanto  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Embora um aço possa conter até 2,11%C, em peso, na prática, raramente as concentrações de carbono excedem 1,0%C, em peso. Ferros fundidos são classificados como ligas ferrosas que contém entre 2,11 e 6,70%C, em peso. Entretanto, ferros fundidos comerciais normalmente contém menos do que 4,5%C, em peso.

### 4.3 - Desenvolvimento de Microestruturas em Ligas Ferro-Carbono

Algumas das diversas microestruturas que podem ser produzidas em aços e suas correlações com o diagrama de fases ferro-carbono do ferro são agora discutidas e é mostrado que a microestrutura que se desenvolve depende tanto do teor de carbono quanto do tratamento térmico. A discussão é confinada a resfriamento muito lento de aços, no qual equilíbrio é continuamente mantido. Uma exposição mais detalhada da influência do tratamento térmico sobre a microestrutura e por fim sobre as propriedades mecânicas, está contida posteriormente.

Considere-se, por exemplo, uma liga de composição eutetóide (0,77%C, em peso) quando ela é resfriada a partir de uma temperatura situada na região da fase  $\gamma$ , digamos, 800°C, isto é, começando no ponto a da Figura 4.3 e movendo-se para baixo ao longo da linha vertical xx'.



Inicialmente, a liga é composta inteiramente da fase austenita, tendo uma composição de 0,77% C, em peso, e a correspondente microestrutura, são indicadas na Figura 4.3. Quando a liga for resfriada, não haverá nenhuma mudança até que se atinja a temperatura eutetóide (727°C). Ao se cruzar esta temperatura para o ponto b, a austenita se transforma de acordo com a reação eutetóide mostrada anteriormente.

A microestrutura para este aço eutetóide que é lentamente resfriado através da temperatura eutetóide, pode ser distinguida pelas suas camadas alternadas de lamelas das 2 fases ( $\alpha$  e  $\text{Fe}_3\text{C}$ ) que se formam simultaneamente durante a transformação. Neste caso, a espessura relativa da camada é aproximadamente 8 para 1.

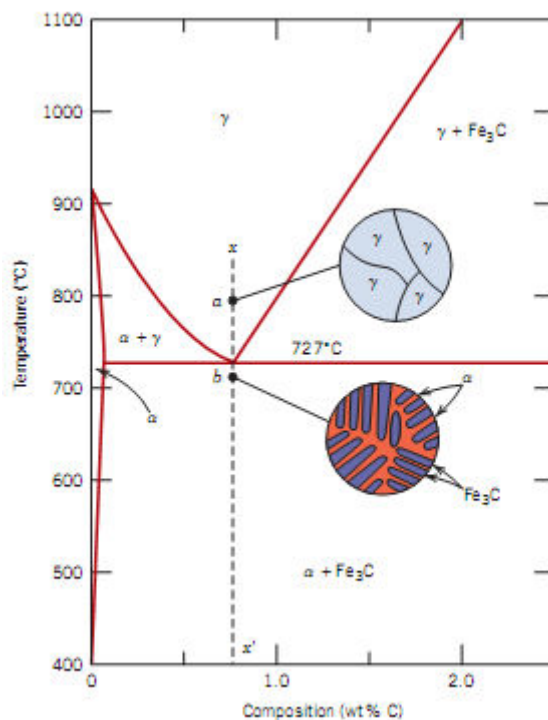


Fig. 4.3 – Resfriamento, seguindo a transformação eutetóide

Esta microestrutura, representada esquematicamente na Figura 4.3, ponto b, é chamada de Perlita. A Figura 4.4 é uma micrografia de um aço eutetóide mostrando a perlita. As espessas camadas claras são da fase ferrita  $\alpha$ , e a fase cementita aparece como lamelas finas em sua maioria aparecendo escuras. Mecanicamente, perlita tem propriedades intermediárias entre a ferrita dúctil e macia e a cementita dura e frágil.

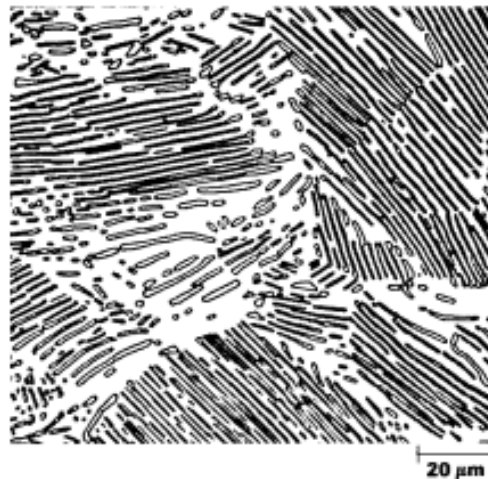


Fig. 4.4 - Perlita

As camadas alternadas  $\alpha$  e  $\text{Fe}_3\text{C}$  na perlita se formam porque a composição da fase que lhe deu origem é diferente de ambas as fases geradas como produto e porque a transformação de fases que exige que exista uma redistribuição do carbono. A Fig. 4.5 mostra esquematicamente as alterações que acompanham essas alterações. Os átomos de carbono se difundem para longe das regiões da ferrita, e em direção às camadas de cementita.

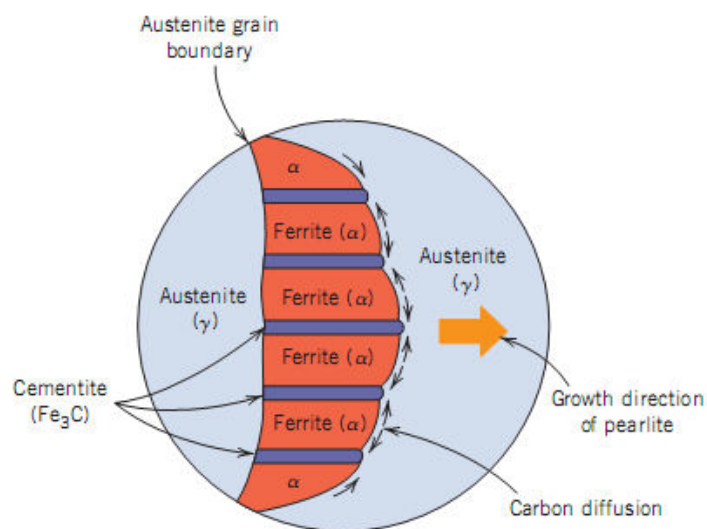


Fig. 4.5 – Difusão do carbono na reação eutetóide

#### 4.4 – Ligas Hipoeutetóides

Microestruturas para ligas ferro-carboneto de ferro tendo composição diferente da eutetóide são agora exploradas. Considere-se uma composição  $C_0$  para o lado esquerdo do ponto eutetóide, entre 0,022 e 0,77% C, em peso; essa é conhecida como uma liga hipoeutetóide (menos do que eutetóide). O resfriamento de uma liga desta composição está representado pelo movimento para baixo ao longo da linha vertical  $yy'$  na Figura 4.6.

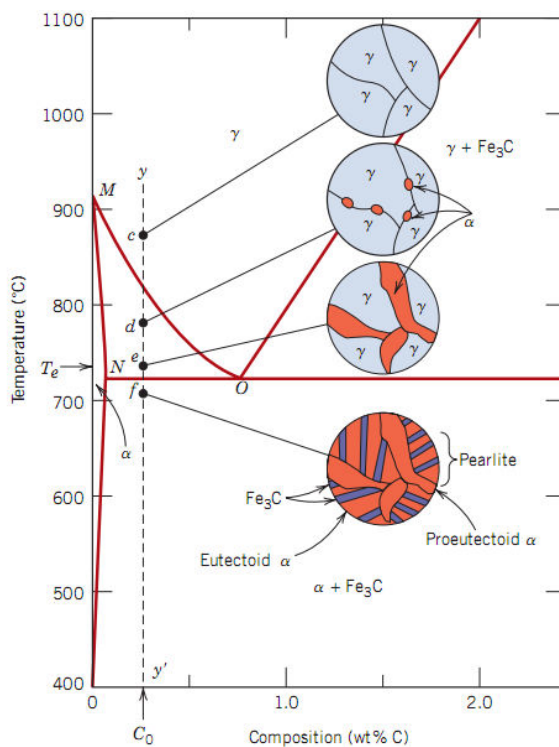


Fig. 4.6 – Transformação Hipoeutetóide

A cerca de 875°C, ponto c, a microestrutura consistirá inteiramente de grãos da fase  $\gamma$ , como mostrado esquematicamente na Fig. 4.6. Ao se resfriar até o ponto d, em torno de 775oC, que está dentro da região de fase  $\alpha + \gamma$ , ambas estas fases coexistirão como na microestrutura esquemática. A maioria das pequenas partículas se formam ao longo dos contornos dos grãos  $\gamma$  originais.

Resfriamento a partir do ponto d até o ponto e, justo acima do ponto eutetóide, mas ainda na região de  $\alpha+\gamma$ , produzirá um aumento na fração da fase  $\alpha$  e uma microestrutura similar àquela também mostrada; as partículas de  $\alpha$  terão crescido e se tornado maior.

A medida que a temperatura é abaixada para imediatamente abaixo da temperatura eutetóide, para o ponto f, toda a fase  $\gamma$  que estava presente na temperatura  $T_e$  (e tendo a composição eutetóide) se transformará em perlita, de acordo com a reação eutetóide. Não haverá virtualmente nenhuma mudança na fase  $\alpha$  que existiu no ponto e ao cruzar a temperatura eutetóide - ela estará normalmente presente como uma fase matriz contínua circundando as isoladas colônias de perlita. A microestrutura no ponto f se aparentará como a correspondente inserção esquemática da Fig. 4.6. Assim, a fase ferrita estará presente tanto na perlita quanto também na forma da fase que se formou durante o resfriamento através da região de fase  $\alpha+\gamma$ . A ferrita que está presente na perlita é chamada ferrita eutetóide, enquanto que a outra, que se formou acima de  $T_e$ , é denominada ferrita proeutetóide, como rotulada na Fig 4.6. A Fig 4.7 é uma micrografia de um aço de 0,38%C, em peso; regiões claras e grandes correspondem à ferrita proeutetóide. Para perlita, o espaçamento entre as camadas  $\alpha$  e  $Fe_3C$  varia de grão a grão; alguma perlita aparenta escura porque as muitas camadas estreitamente espaçadas não estão resolvidas na ampliação da micrografia. Pode-se também notar que 2 microconstituintes estão presentes nesta micrografia - ferrita proeutetóide e perlita – estão presentes em todas as ligas ferro-carbono hipoeutetóides que são lentamente resfriadas até uma temperatura inferior à eutetóide

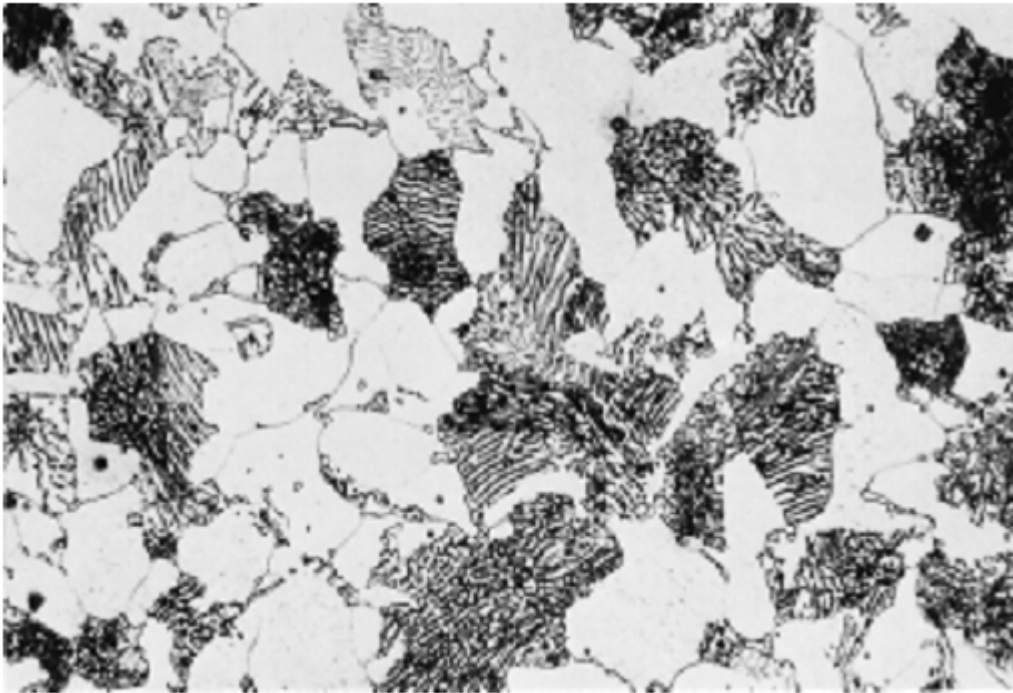


Fig. 4.7 – Aço hipoeutetóide 0,38%pC

#### 4.5 – Ligas Hipereutetóides

Análogas transformações e microestruturas resultam para ligas hipereutetóides, aquelas contendo entre 0,77 e 2,11%C, em peso, que são resfriadas a partir de temperaturas situadas dentro do campo de fase  $\gamma$ . Considere-se uma liga de composição C1 na Figura 4.8 que, no resfriamento, se move para baixo ao longo da linha  $zz'$ . Num ponto g somente a fase  $\gamma$  estará presente com uma composição de C1; a microestrutura parecerá tal como mostrada, tendo apenas grão  $\gamma$ . No resfriamento para dentro do campo de fases  $\gamma + Fe_3C$ , digamos, até o ponto h, a fase cementita começará a se formar ao longo dos contornos de grão  $\gamma$  originais, similar à fase  $\alpha$  na Figura 4.6, ponto d. Esta cementita é chamada cementita proeutetóide - aquela que se forma antes da reação eutetóide. Naturalmente, a composição da cementita permanece constante (6,70%C, em peso) enquanto a temperatura muda. Entretanto, a composição da fase austenita se moverá ao longo da linha PO em direção ao ponto eutetóide. A medida em que a temperatura é abaixada através do ponto eutetóide i, toda a austenita remanescente de composição eutetóide é convertida em perlita.

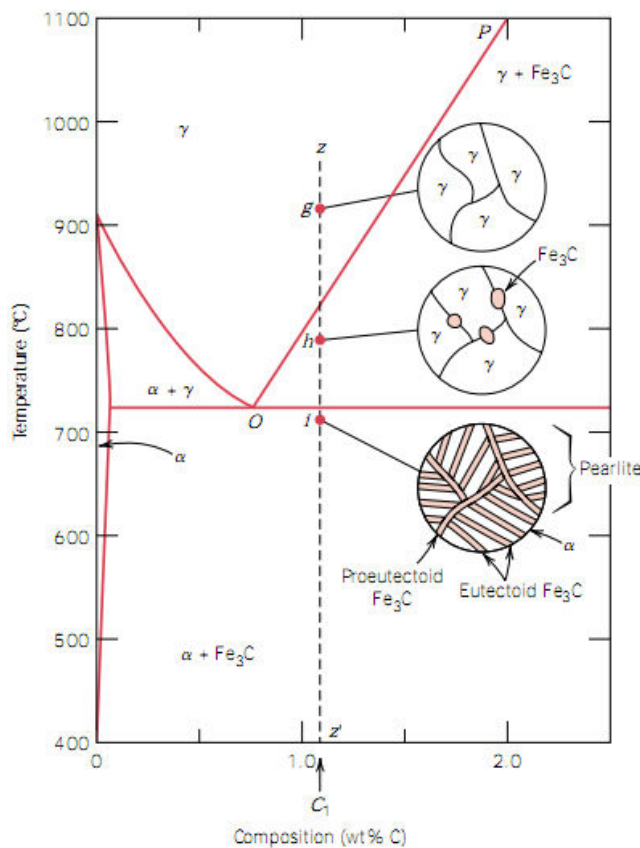


Fig. 4.8 - Transformação Hipereutetóide

#### 4.6 – Resfriamento Fora do Equilíbrio

Nesta discussão sobre desenvolvimento microestrutural de ligas ferro-carbono foi suposto que, no resfriamento, condições de equilíbrio metaestável foi continuamente mantido; isto é, suficiente tempo foi permitido em cada nova temperatura para qualquer necessário ajuste nas composições das fases e nas quantidades relativas de fases como previsto pelo diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C. Na maioria das situações estas taxas de resfriamento são impraticavelmente lentas e realmente desnecessárias; de fato, em muitas ocasiões condições de fora de equilíbrio são desejáveis.

## EXERCÍCIOS

- 1) Desenhe o diagrama de fases para ferro-carbono, mostre todas as fases e especifique cada uma?
- 2) Mostre e fale sobre as reações Eutetóide e Eutética.
- 3) Fale sobre a microestrutura perlítica, quais as fases presentes? Como é formada?

## 5. AÇOS E FERROS FUNDIDOS

### 1. INTRODUÇÃO

O Ferro é o metal mais utilizado pelo homem. A abundância dos minerais, o custo relativamente baixo de produção e as múltiplas propriedades físico-químicas que podem ser obtidas com adição de outros elementos de liga são fatores que dão ao metal uma extensa variedade de aplicações.

Alguns metais (cobre, por exemplo) podem ser empregados no estado quimicamente quase puro. Entretanto, isso não ocorre com o ferro. No uso prático, está sempre ligado ao carbono e a outros elementos e, assim, no âmbito da ciência dos materiais e também na linguagem do dia-a-dia, a palavra ferro pode ser entendida como uma liga dos elementos químicos ferro, carbono e outros.

Os itens a seguir dão algumas definições básicas.

Aço: denominação genérica para ligas de ferro-carbono com teores de carbono de 0,08 a 2,11%, contendo outros elementos residuais do processo de produção e podendo conter outros propositalmente adicionados (elementos de liga).

- Aço-carbono: aço sem adição de elementos de liga.
- Aço-liga: aço com adição de elementos de liga.
- Ferro fundido: designação genérica para ligas de ferro-carbono com teores de carbono acima de 2,11%.

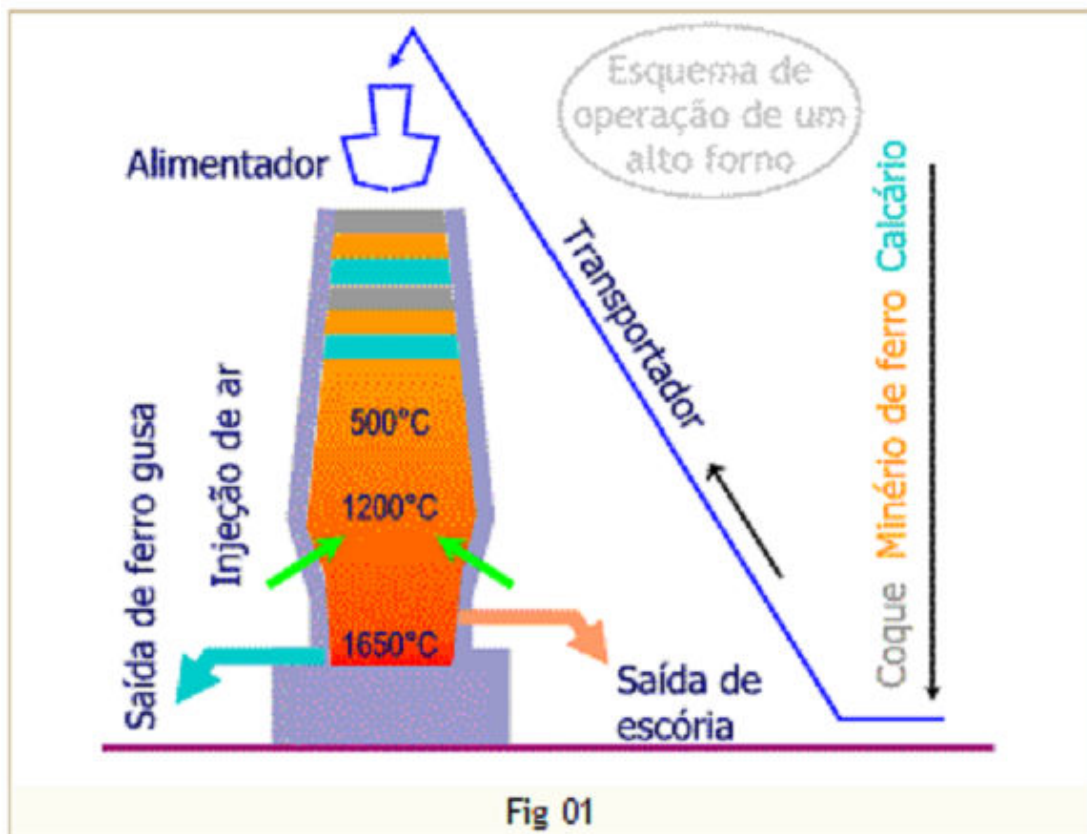
### 2. PRODUÇÃO

À metalurgia do aço, dá-se o nome de siderurgia. São apresentadas aqui, algumas informações resumidas sobre a produção siderúrgica, sem maiores detalhes.



A produção do aço a partir do minério é dada pela redução química do óxido nele contido com o carbono.

O equipamento usado é um forno de formato cilíndrico vertical e de grande altura, por isso chamado de alto-forno.



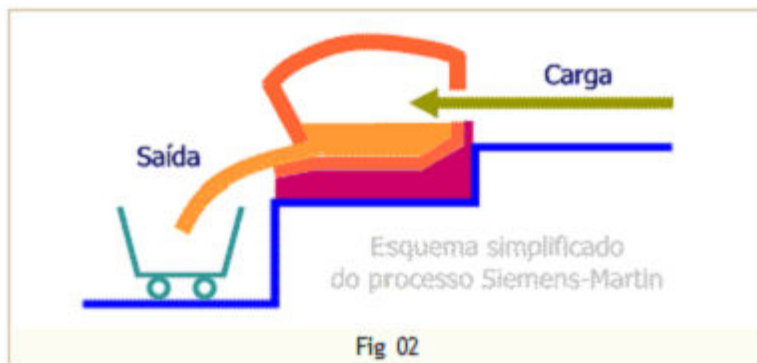
São basicamente três os ingredientes que são dispostos no alto-forno (fisicamente alimentados na parte superior do forno através de transportadores e outros equipamentos):

- 1) O minério de ferro, isto é, a substância que contém o óxido.
- 2) O calcário (rocha à base de carbonato de cálcio), cuja função básica é a remoção de impurezas.
- 3) O coque, que é o agente combustível e redutor. Coque é normalmente produzido na própria siderúrgica, através da queima parcial do carvão mineral. Isso é necessário para remover o material volátil do carvão e, assim, aumentar sua resistência mecânica de forma a suportar a carga de minério e calcário.

Na Figura 01, um esquema simplificado da operação de um alto-forno.

O gás que sai da parte superior do forno é destilado para obter produtos como benzol, naftalina e outros. Após esse processo, o gás ainda tem poder combustível e pode ser usado na própria siderúrgica ou distribuído para outros consumidores.

O processo é consumidor intensivo de ar. Os dados a seguir são valores típicos para cada tonelada produzida pelo alto-forno.



- 2 t de minério.
- 0,5 t de calcário.
- 1 t de coque.
- 4 t de ar.

Há ainda os principais subprodutos:

- 0,5 t de escória.
- 0,6 t de gás.

O ferro que sai do alto-forno, denominado ferro-gusa, contém elevados teores de carbono e de impurezas. Há necessidade, portanto, de um processo de refino para transformá-lo em aço de utilidade prática. Um dos principais processos é o Siemens-Martin, que consiste no aquecimento, por determinado período, do ferro-gusa misturado com sucata de aço, em temperaturas na faixa de 1650°C. Esquema simplificado conforme Figura 02.

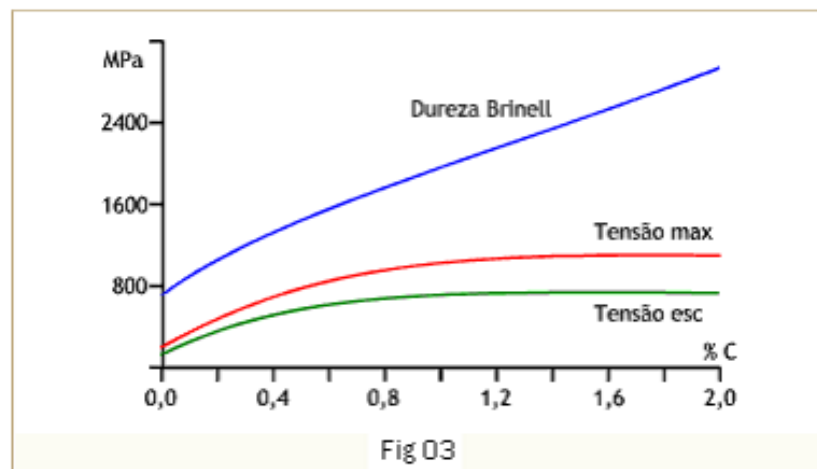
## 3. EFEITOS DO TEOR DE CARBONO

O teor de carbono exerce significativa influência nas propriedades mecânicas dos aços.

As curvas do gráfico da Figura 03 abaixo mostram, de forma aproximada, as variações de dureza e de tensões de tração máxima e de escoamento com o teor de carbono do aço.

Pode-se notar que a dureza aumenta progressivamente com o teor de carbono e que as tensões de tração também aumentam nos aços hipoeutetóides, mas tendem a estabilizar-se nos hipereutetóides.

Na maioria dos materiais, a contrapartida para maior dureza é maior fragilidade ou menor ductilidade. E essa regra é também válida para os aços.



Os gráficos da Figura 04 dão variações aproximadas do alongamento e resistência ao impacto em função do teor de carbono. Portanto, teores maiores de carbono implicam maior fragilidade e menor ductilidade.

Outro aspecto, importante em aplicações estruturais, é a capacidade de soldagem. Aços com até 0,3% C são considerados de soldagem fácil. De 0,3 a 0,5%, média. E, acima de 0,5% C, são de soldagem difícil.

## 4. EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA

Quando mencionado elementos de liga, deve ficar subentendido que são outros elementos além do ferro e do carbono, uma vez que estes últimos são os constituintes básicos do aço.

Alumínio (Al): é usado em pequenas proporções, como desoxidante e agente de controle do crescimento dos grãos.

Chumbo (Pb): não se liga ao aço mas, quando adicionado, distribui-se na estrutura em forma de partículas microscópicas, o que resulta em maior facilidade de usinagem. Entretanto, devido ao baixo ponto de fusão (cerca de 327°C), aços com chumbo não devem ser usados em temperaturas acima de 250°C.

Cobalto (Co): aumenta a dureza do aço sob altas temperaturas.

Cobre (Cu): melhora a resistência à corrosão por agentes atmosféricos, se usado em teores de 0,2 a 0,5%.

Cromo (Cr): melhora a resistência à corrosão (aço com cerca de 12% Cr resiste à ação da água e de vários ácidos), aumenta a resistência à tração (em média, 80 MPa para cada 1% de cromo), melhora a facilidade de têmpera, aumenta a resistência à alta temperatura e ao desgaste.

Enxofre (S): é, na maioria dos casos, um elemento indesejável, oriundo do processo de produção. Se combinado com o ferro na forma de sulfeto, deixa o aço quebradiço. Entretanto, se combinado com o manganês no forma do respectivo sulfeto, favorece a usinagem com a formação de cavacos que se quebram facilmente.

Fósforo (P): é considerado um elemento prejudicial, resultante do processo de produção. Torna o aço frágil, efeito que se acentua com o aumento do teor de carbono. Assim, os teores máximos permitidos devem ser controlados com rigor em aços para aplicações estruturais ou críticas.

Manganês (Mn): em média, para cada 1% de manganês, a resistência à tração aumenta 100 MPa. Para aços temperáveis, aumenta a dureza após o processo de têmpera.

Molibdênio (Mo): melhora a resistência a altas temperaturas, a resistência ao desgaste e a dureza após a têmpera. Para aços inoxidáveis, melhora a resistência à corrosão.

Níquel (Ni): em média, para cada 1% de níquel, a resistência à tração aumenta 40 MPa, mas o limite de elasticidade é mais favorecido. Melhora significativamente a capacidade de têmpera, possibilitando redução da velocidade de resfriamento. O níquel altera a alotropia do ferro e teores acima de 25% fazem reter a austenita em temperaturas usuais, fazendo um aço austenítico, que é não magnético e bastante resistente à corrosão. Com 36% de Ni, o aço tem o menor coeficiente de dilatação térmica e é usado em instrumentos de medição. Em conjunto com o cromo, o aço pode ser austenítico com a combinação 18% Cr e 8% Ni.

Silício (Si): é um agente desoxidante na produção do aço. Aumenta a resistência à corrosão e a resistência à tração, mas prejudica a soldagem. O silício aumenta significativamente a resistividade elétrica do aço e, por isso, aços com silício são amplamente usados em núcleos magnéticos (motores, transformadores, etc) devido às menores perdas com as correntes parasitas que se formam.

Tungstênio (W): aumenta a resistência à tração em altas temperaturas. Forma carbonetos bastante duros e é usado em aços para ferramentas (aços rápidos).

Vanádio (V): refina a estrutura do aço, impedindo o crescimento dos grãos. Forma carbonetos duros e estáveis e é usado em aços para ferramentas para aumentar a capacidade de corte e dureza em altas temperaturas.

## 5. CODIFICAÇÃO DOS AÇOS

Existem várias entidades que estabelecem normas para codificação de aços de acordo com o teor de carbono e dos elementos de liga. Na tabela abaixo, alguns códigos da SAE (Society of Automotive Engineers). Obs.: os dois últimos algarismos (xx) indicam o teor de carbono em 0,01%. Exemplo: um aço SAE 1020 tem 0,20 % de carbono.

Código SAE Descrição ou principais elementos de liga:

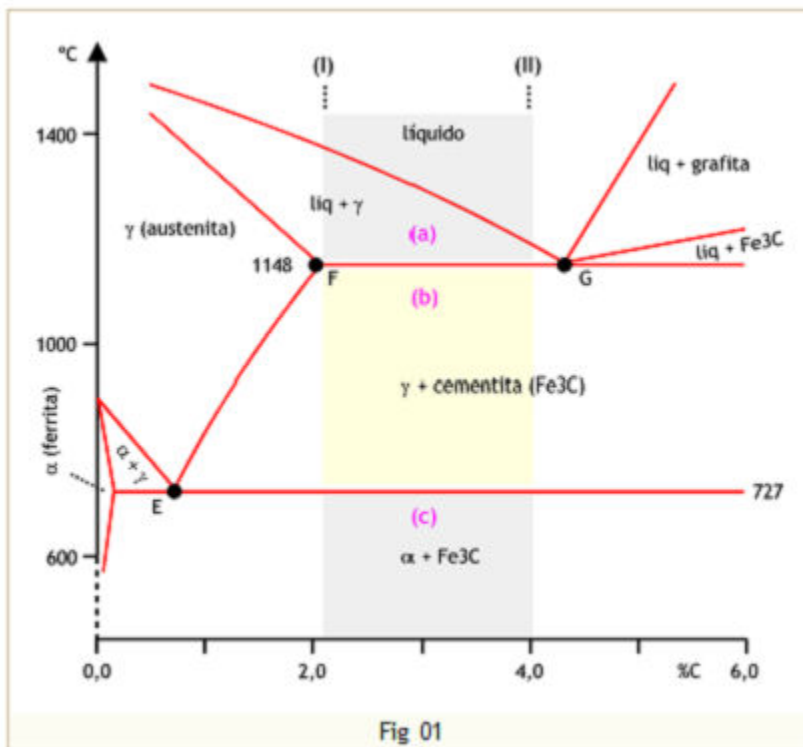
<b>Código SAE</b>	<b>Descrição ou principais elementos de liga</b>
10xx	Aços-carbono de uso geral
11xx	Aços de fáceis usinagens, com enxofre
13xx	Manganês (1,75%)
15xx	Manganês (1,00%)
23xx	Níquel (3,50%)
25xx	Níquel (5,00%)
31xx	Níquel (1,25%), cromo (0,65%)
33xx	Níquel (3,50%), cromo (1,55%)
40xx	Molibdênio (0,25%)
41xx	Cromo (0,50% ou 0,95%), molibdênio (0,12% ou 0,20%)
43xx	Níquel (1,80%), cromo (0,50% ou 0,80%), molibdênio (0,25%)
47xx	Níquel (1,05%), cromo (0,45%), molibdênio (0,25%)
48xx	Níquel (3,50%), molibdênio (0,25%)
50xx	Cromo (0,28% ou 0,40%)
51xx	Cromo (0,80%; 0,90%; 0,95%; 1,00% ou 1,05%)
61xx	Cromo (0,80% ou 0,90%), vanádio (0,10% ou 0,15%)
86xx	Níquel (0,55%), cromo (0,50% ou 0,65%), molibdênio (0,20%)
87xx	Níquel (0,55%), cromo (0,50%), molibdênio (0,25%)
92xx	Manganês (0,85%), silício (2,00%)
93xx	Níquel (3,25%), cromo (1,20%), molibdênio (0,12%)
94xx	Manganês (1,00%), níquel (0,45%), cromo (0,40%), molibdênio (0,12%)
97xx	Níquel (0,55%), cromo (0,17%), molibdênio (0,20%)
98xx	Níquel (1,00%), cromo (0,80%), molibdênio (0,25%)

## FERROS FUNDIDOS

### 1. CONSIDERAÇÕES BÁSICAS

Ferros fundidos, conforme informações básicas já vistas em página anterior são ligas de ferro e carbono, com teores deste último acima de 2,11%. O silício está quase sempre presente, e contêm outros elementos, residuais de processo ou propositalmente adicionados.

A maioria dos ferros fundidos comerciais apresenta teores de carbono até 4%. Portanto, no diagrama Fe-C da Figura 01, estão na faixa indicada, de (I) até (II).



São em geral produzidos a partir do ferro-gusa refundido e sucatas, mediante procedimentos e etapas para reduzir teores de elementos indesejáveis como fósforo e enxofre.

Na linguagem do dia-a-dia, a expressão ferro fundido é associada ao ferro fundido cinzento, que é o mais antigo tipo conhecido e produzido. Assim, uma característica desse tipo (resistente, mas quebradiço) é às vezes considerada válida para todos os ferros fundidos, o que não tem fundamento. Há tipos com propriedades mecânicas completamente diversas.

Esta nota não tem o propósito de dar informações completas sobre os processos de produção, mas apenas alguns dados aproximados para a compreensão das variedades comuns do material. Na tabela abaixo, consideram-se as transformações a partir da fase líquida (a) do diagrama da Figura 01 até a fase sólida (c), do material no estado final. Os desenhos das estruturas microscópicas são meramente ilustrativos e aproximados.

Serão usados os símbolos abaixo para os constituintes diversos dos ferros fundidos:

$\alpha$ : ferrita (solução sólida de carbono em ferro alfa);

$\gamma$ : austenita (solução sólida em ferro gama);



GE: grafita em forma de esferóides;


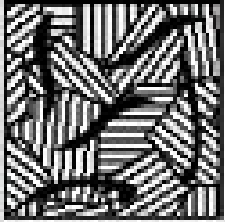
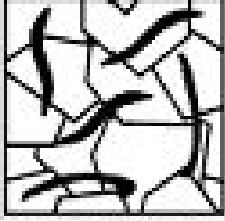
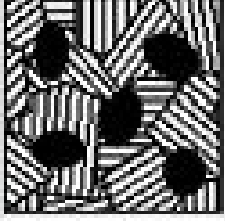
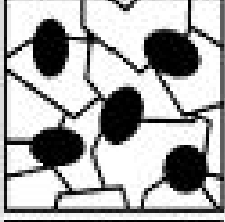
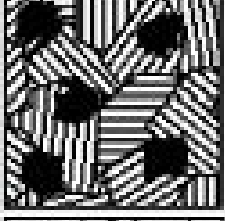
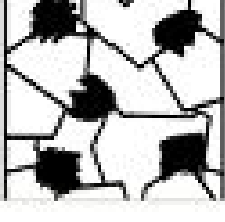
GL: grafita livre;

GV: grafita em forma de veios;

P: perlita (ferrita + cementita,  $Fe_3C$ , laminar);

No item 01, a elevada velocidade de resfriamento (além dos ajustes dos teores de carbono e silício) impede a formação de grafita e quase todo o carbono fica na forma de cementita, resultando no ferro fundido branco.



Item	Resfriam	Região (a)	Região (b)	Região (c)	Nome	Estrutura
01	Rápido	$\gamma +$ líquido	$\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$	$\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}$	Ferro fundido branco	
02	Médio	$\gamma +$ líquido	$\gamma + \text{GV}$	$\text{P} + \text{GV}$	Ferro fundido cinzento perlítico	
03	Lento	$\gamma +$ líquido	$\gamma + \text{GV}$	$\alpha + \text{GV}$	Ferro fundido cinzento ferrítico	
04	Médio	$\gamma +$ líquido	$\gamma + \text{GS}$	$\text{P} + \text{GE}$	Ferro fundido dúctil perlítico	
05	Lento	$\gamma +$ líquido	$\gamma + \text{GS}$	$\alpha + \text{GE}$	Ferro fundido dúctil ferrítico	
06	Rápido	-	$\gamma + \text{GL}$	$\text{P} + \text{GL}$	Ferro fundido maleável perlítico	
07	Lento	-	$\gamma + \text{GL}$	$\alpha + \text{GL}$	Ferro fundido maleável ferrítico	

Nos itens 02 e 03, velocidades menores de resfriamento permitem a grafitação na forma de veios, produzindo ferros fundidos cinzentos. Os ferros fundidos dúcteis ou nodulares (itens 04 e 05) têm composição semelhante á dos cinzentos, mas a grafita tem forma esferoidal pela ação de agentes como o magnésio ou cério e baixos teores de enxofre.

Os ferros fundidos maleáveis (itens 06 e 07) são produzidos a partir do branco. Por isso, a região (a) da tabela é vazia. As peças de ferro fundido branco são submetidas a um aquecimento prolongado, que pode ser na presença de um meio adequado. A grafita resultante tem forma livre.

Há também o ferro fundido mesclado, obtido mediante ajuste da velocidade de resfriamento e de outros parâmetros, de forma que a camada superficial é tipo branco e a interior, cinzento. Isso proporciona elevada dureza superficial e menor fragilidade da peça.

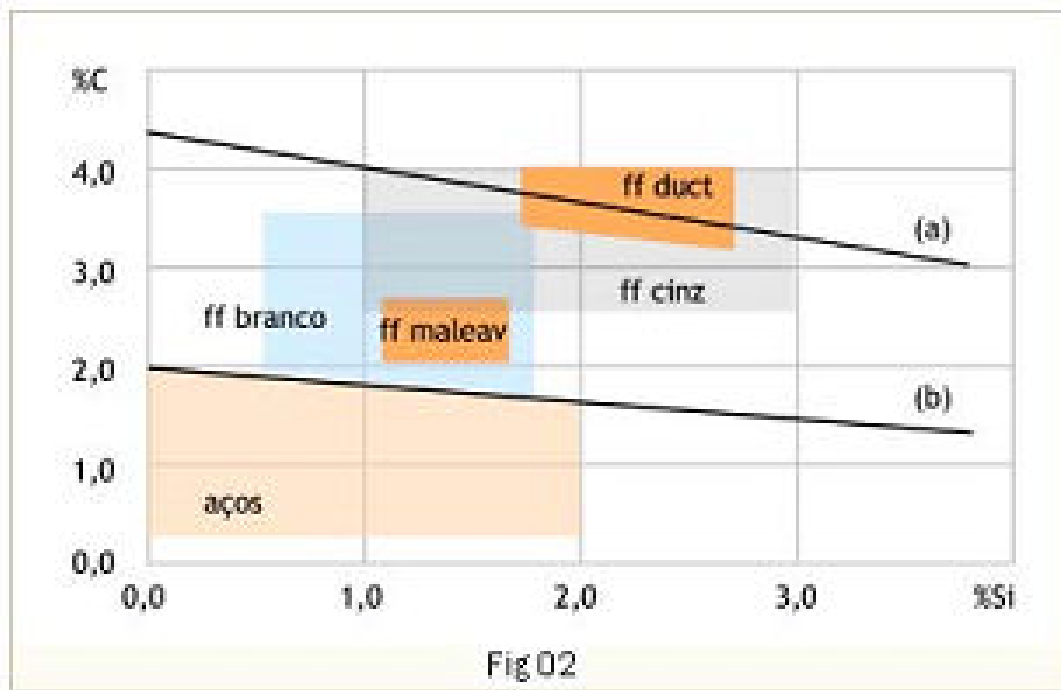
## 2. A PRESENÇA DO SILÍCIO

Rigorosamente, os ferros fundidos deveriam ser estudados como ligas Fe-C-Si. Entretanto, o uso de diagramas de três elementos é um tanto complexo e, na prática, é adotado um conceito aproximado mais simples.

Considera-se que o silício produz efeito similar a um teor de carbono equivalente Ce de carbono dado pela fórmula:

$$Ce = \%C + (1/3) \%Si.$$

Essa igualdade é representada pela reta (a) do gráfico da Figura 02 ao lado. Em (b), há igualdade similar, com o coeficiente (1/6) em vez de (1/3).



E as faixas usuais de teores para aços e ferros fundidos são dadas no mesmo gráfico.

Exemplo: um ferro com 3,6%C e 2,3%Si pode ser considerado equivalente a um com 3,2%C e 3,5%Si. Em geral, pode-se dizer que o silício favorece a formação de grafita no ferro fundido.

### 3. FERRO FUNDIDO BRANCO

A superfície recém-cortada tem aparência clara devido à ausência de grafite, uma vez que quase todo o carbono está na forma de carboneto. É extremamente duro e resistente ao desgaste, mas é quebradiço e de difícil usinagem, mesmo com as melhores ferramentas.

Em peças, suas aplicações são limitadas a casos onde a dureza e a resistência à abrasão são fundamentais, como cilindros de laminação, matrizes de estampagem, etc. Em geral, é usado na forma mesclada. Neste caso, alguns elementos de liga, como níquel, cromo e molibdênio, podem ser adicionados para controlar a profundidade da camada e melhorar a resistência ao desgaste e à oxidação.

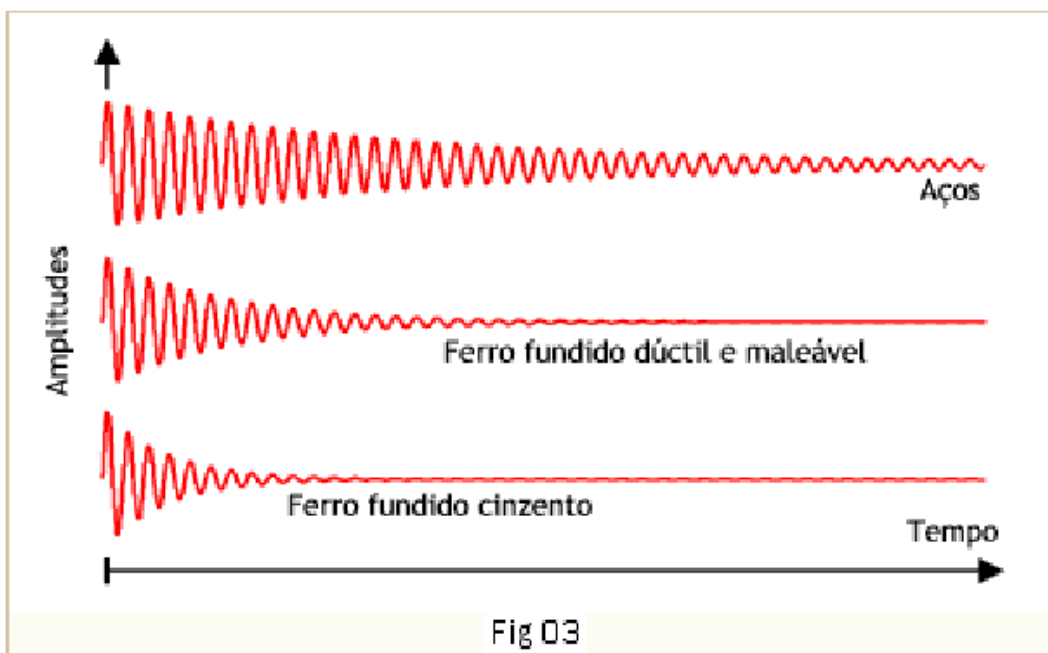
Uma composição típica de ferro fundido branco é 3-3,6% C, 0,8% Si, 1,3% Mn, 3,3-5% Ni, 1,4-4% Cr, 1% Mo, 0,15% S, 0,3% P. Usado também para produzir ferro maleável.

## 4. FERRO FUNDIDO CINZENTO

Assim denominado devido ao aspecto da superfície recém-cortada. Isso ocorre em função da existência de veios de grafita sobre matriz de perlita ou de ferrita (também pode ser uma combinação de ambas).

Os veios de grafita exercem considerável influência no comportamento mecânico. Eles produzem aumentos localizados de tensões, que podem iniciar pequenas deformações plásticas sob tensões relativamente baixas na peça e trincas sob esforços maiores.

Como resultado, uma peça de ferro fundido cinzento não tem, na prática, comportamento elástico, mas dispõe de um elevado fator de amortecimento de vibrações, característica importante no caso de máquinas operatrizes. A Figura 03 dá uma comparação gráfica aproximada.



Podem-se resumir algumas das vantagens do ferro fundido cinzento:

- elevada capacidade de amortecimento de vibrações.
- usinagem facilitada pelos veios de grafita, que favorecem a quebra de cavacos e a durabilidade das ferramentas.
- razoavelmente resistente à corrosão de vários ambientes comuns (superior aos aços-carbono).
- boa fluidez, facilitando a fundição de peças complexas.
- boas características de deslizamento a seco devido à presença da grafita.
- baixo custo de produção.

Algumas desvantagens são:

- estruturalmente, os veios de grafita atuam como espaços vazios, reduzindo a resistência mecânica. Normalmente, tensão máxima de trabalho recomendada cerca de 1/4 da tensão de ruptura. Carga máxima de fadiga cerca de 1/3 da resistência à fadiga.
- é quebradiço, pouco resistente a impactos.
- características de usinagem variam com as dimensões da seção da peça.

Faixas típicas de composições: 2,5-4% C; 1-3% Si; 0,3-1% Mn; 0,05-0,25% S; 0,1-1% P. Limites de resistência à tração variam de 140 a 410 MPa. Pode receber elementos de liga e ser tratado termicamente para melhores propriedades mecânicas, térmicas ou químicas (corrosão).

Ferros fundidos cinzentos são empregados em estruturas de máquinas e peças fundidas diversas, sem grandes exigências de resistência mecânica.

## 5. FERRO FUNDIDO DÚCTIL (OU NODULAR)

O ferro fundido dúctil é amplamente empregado por apresentar um bom compromisso entre custos e propriedades mecânicas, algumas delas próximas dos aços. A ductilidade é

claramente vista pelos valores de alongamento, que podem chegar a 18% ou mais (25% por exemplo). Limites de resistência à tração podem ser tão altos quanto 800 MPa. Outra característica importante é a baixa contração na solidificação, o que facilita a produção e reduz o custo de peças fundidas.

Faixas típicas de composições são: 3,2-4% C; 1,8-3% Si; 0,1-1% Mn; 0,005-0,02% S; 0,01-0,1% P.

Tratamentos térmicos podem ser aplicados (alívio de tensões, recozimento, normalização, têmpera e revenido, têmpera superficial, austêmpera). Elementos de liga como níquel, molibdênio ou cromo podem ser usados para aumentar dureza e outras propriedades.

Algumas aplicações: válvulas para vapor e produtos químicos, cilindros para papel, virabrequins, engrenagens, etc. 6. FERRO FUNDIDO MALEÁVEL

Conforme já visto, o ferro fundido maleável é obtido a partir do branco. A ductilidade não é das mais altas, algo na faixa de 10%. Grosso modo, pode-se dizer que apresenta valores entre os do ferro fundido cinzento e os do aço.

Algumas vantagens são a facilidade de usinagem e a boa resistência ao choque. Mas apresenta certa contração na solidificação, o que exige cuidados na fundição para evitar falhas.

Faixas de composições típicas são: 2-2,8% C; 0,9-1,6% Si; 0,5% max Mn; 0,1% max S; 0,2% max P.

Algumas aplicações: conexões para tubulações, sapatas de freios, caixas de engrenagens, cubos de rodas, bielas, etc.

## EXERCÍCIOS

- 1) Fale sobre a fabricação do ferro gusa e qual a sua importância na fabricação do aço.
- 2) Comente sobre os efeitos do carbono na ferro, fale sobre as propriedades adquiridas e modificadas com o aumento do teor de carbono.
- 3) Defina Aço e Ferro Fundido.
- 4) Fale sobre os Ferros Fundidos, liste os tipos, definindo-os e falando sobre suas propriedades.

## 6 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS METAIS

### 6.1 – INTRODUÇÃO

Muitos materiais, quando em serviço, são submetidos a forças ou cargas; exemplos incluem a liga de alumínio a partir da qual uma asa de avião é construída e o aço do eixo da roda de um automóvel. Em tais situações é necessário conhecer as características do material e projetar o elemento estrutural a partir do qual ele é feito de tal maneira que qualquer deformação não seja excessiva e que não ocorra fratura. O comportamento mecânico do material reflete a correlação entre sua resposta a uma carga ou força aplicada. Importantes propriedades mecânicas são resistência mecânica, dureza, ductilidade e rigidez.

As propriedades mecânicas de materiais são determinadas pela execução de experimentos, cuidadosamente projetados, de laboratório que replicam tanto quanto possível as condições de trabalho. Fatores a serem considerados incluem a natureza da carga aplicada e a sua duração, bem como as condições ambientais.

Materiais são frequentemente escolhidos para aplicações estruturais porque eles possuem combinações desejáveis de características mecânicas. A presente discussão está confinada principalmente ao comportamento mecânico de metais. Este capítulo discute o comportamento tensão-deformação de metais e as principais propriedades mecânicas relacionadas a ele e examina outras características mecânicas.

### 6.2 – CONCEITOS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO

Se uma carga é estática ou varia de maneira relativamente lenta com o tempo e está aplicada uniformemente sobre uma seção reta ou superfície de um elemento estrutural, o comportamento mecânico pode ser determinado por um teste simples de tensão-deformação; este teste é muito comumente conduzido para metais à temperatura ambiente. Existem 4 principais meios nos quais uma carga pode ser aplicada, isto é: tração, compressão, cisalhamento e torção.



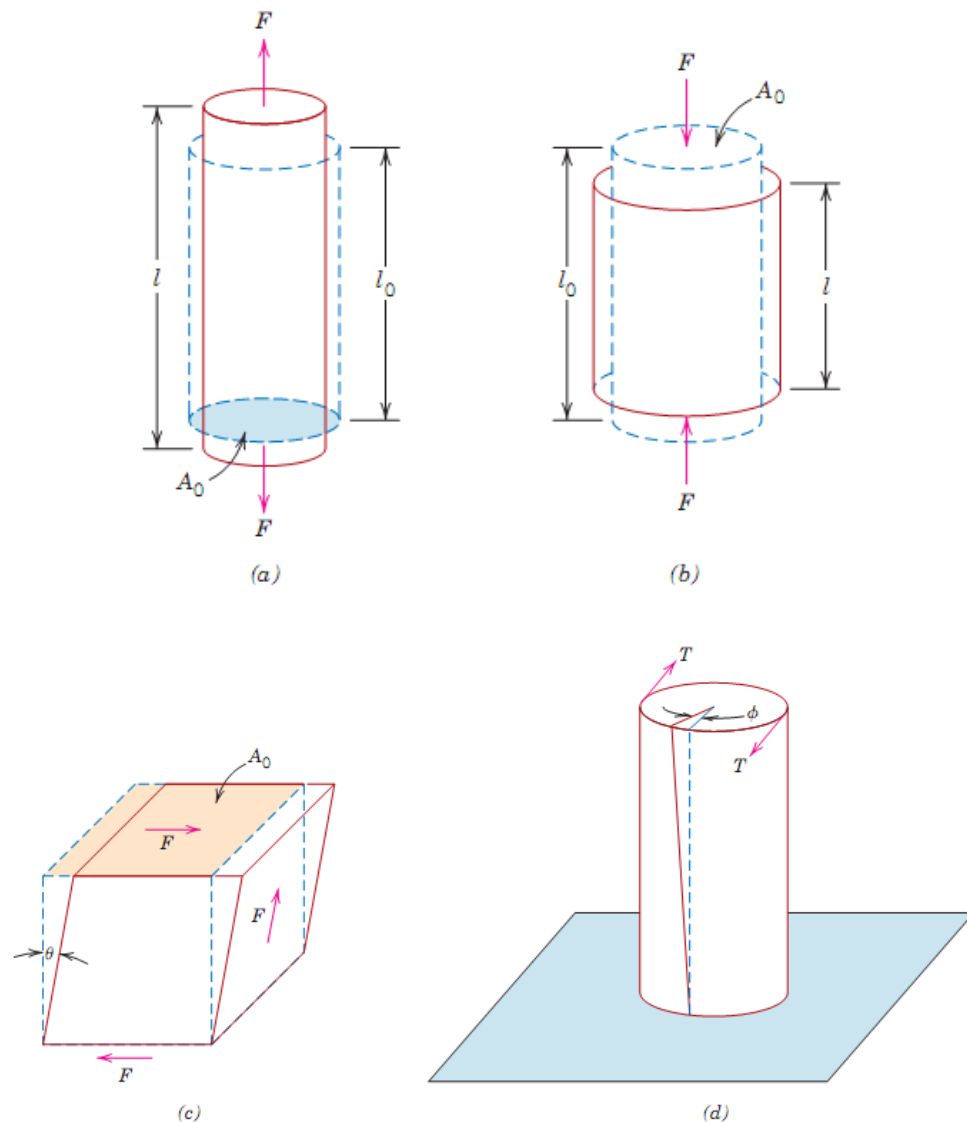


Figura 6.1 – Ilustração esquemática de como uma carga produz deformação em (a) Tração, (b) Compressão, (c) Cisalhamento e (d) Torção.

## ENSAIO DE TRAÇÃO

Um dos testes mecânicos mais comuns de tensão-deformação é realização em tração. Como será visto, o teste de tração pode ser usado para determinar várias propriedades mecânicas dos materiais que são importantes em projeto. Uma amostra é deformada, usualmente até a fratura,

com uma carga de tração que é aplicada ao longo do eixo de uma amostra. Uma amostra padrão de tração é mostrada na Figura 6.2. Normalmente, a seção reta é circular, mas amostras retangulares são também usadas. Durante o teste, a deformação é confinada a uma estreita região central, que tem uma seção reta uniforme ao longo do seu comprimento.

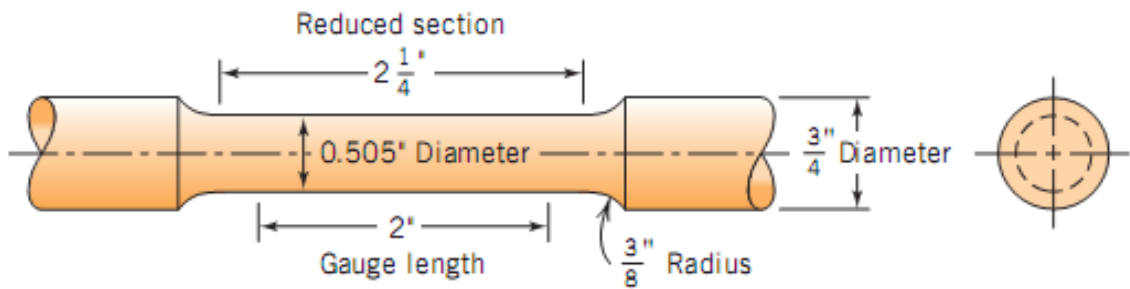


Figura 6.2 – Um corpo de Prova padrão para ensaios de tração com seção reta circular

A amostra é montada por suas extremidades que são colocadas dentro das garras do aparelho de teste (Figura 6.3). A máquina de teste de tração é projetada para alongar a amostra numa taxa constante e para medir continuamente e simultaneamente a carga aplicada (com uma célula de carga) e as resultantes elongações (usando um extensômetro). Um teste de tensão-deformação tipicamente toma vários minutos para executar e é destrutivo; isto é, a amostra de teste é permanentemente deformada e fraturada (rompida).

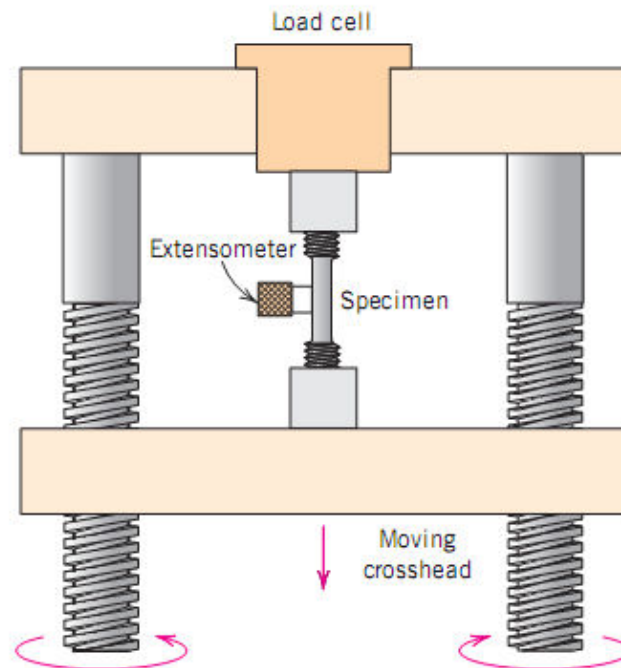


Figura 6.3 – Representação esquemática do dispositivo usado para conduzir ensaios de tração

O resultado do ensaio de tração é uma curva de tensão e deformação, onde pode-se avaliar os níveis de deformação para cada carga aplicada no material, A Figura 6.4 mostra um exemplo de uma curva tensão deformação.

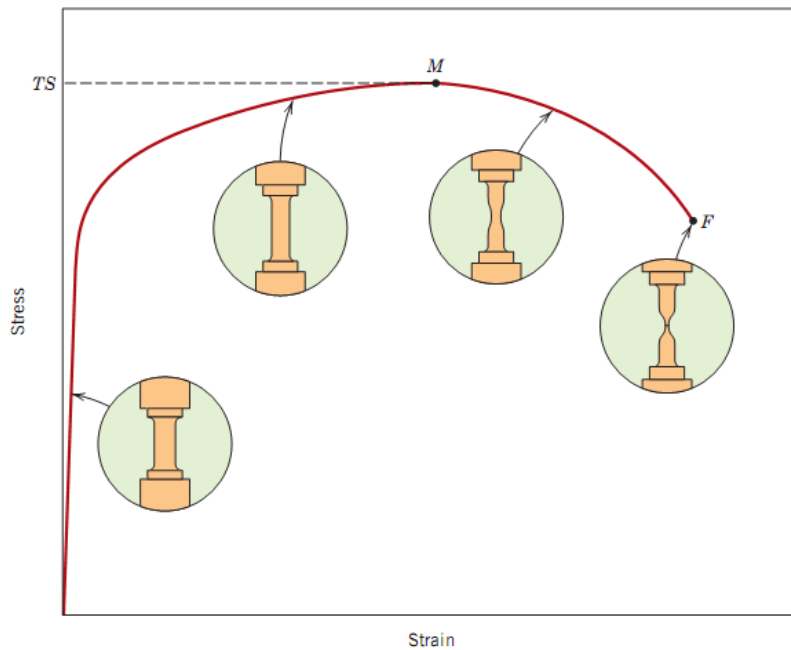


Figura 6.4 – Comportamento típico de curvas tensão deformação

## ENSAIO DE COMPRESSÃO

Ensaio de compressão podem ser conduzidos se as forças em serviço forem deste tipo. Um teste de compressão é conduzido numa maneira similar àquela de um teste de tração, exceto que a força é compressiva e a amostra se contrai ao longo da direção da tensão. Testes de tração são mais comuns porque eles são mais fáceis de executar; também, para muitos materiais usados em aplicações estruturais, muito pouca informação adicional é obtida a partir de testes de compressão de forma que a maioria dos materiais metálicos comportam-se da mesma maneira em cada teste.

## DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

O grau até onde uma estrutura se deforma depende da magnitude de uma tensão imposta. Para muitos metais que são tensionados em tração e em relativamente baixos níveis, tensão e deformação são proporcionais entre si através de uma correlação:

$$\sigma = E \varepsilon$$

Esta correlação é conhecida como a lei de Hooke onde  $\sigma$  é a tensão que a peça é submetida,  $\varepsilon$  é a deformação associada a tensão  $\sigma$  e a constante de proporcionalidade  $E$  é o módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade pode ser inicialmente associado ao quão um material é deformável, ou seja, quanto maior for o valor do módulo de elasticidade menos deformável será o material, a Tabela 6.1 apresenta valores de  $E$  para vários materiais.

Tabela 6.1 – Módulo de Elasticidade para várias ligas metálicas

Liga Metálica	Módulo de Elasticidade	
	GPa	10 <sup>6</sup> psi
Alumínio	69	10
Latão	97	14
Cobre	110	16
Magnésio	45	6,5
Níquel	207	30
Aço	207	30
Titânio	107	15,5

A processo de deformação na qual tensão e deformação são proporcionais é chamada deformação elástica; um gráfico de tensão (ordenada) versus deformação (abscissa) resulta numa correlação linear, como mostrado na Figura 6.5. Quanto mais íngreme for o gráfico maior será o módulo de elasticidade, podemos associar o módulo de elasticidade como a rigidez ou uma resistência do material à deformação elástica. Quanto maior o módulo, tanto mais rígido é o material, ou menor é a deformação elástica que resulta da aplicação de uma dada tensão. O módulo é um importante parâmetro de projeto usado para calcular deformações elásticas.

A deformação elástica não é permanente, o que significa que quando a carga aplicada for aliviada, a peça se retorna à sua forma original. Como mostrado no gráfico de tensão-deformação (Figura 6.5), aplicação da carga corresponde a mover-se a partir da origem para cima e ao longo da linha reta. Ao se aliviar a carga, a linha é atravessada no sentido oposto, de volta à origem.

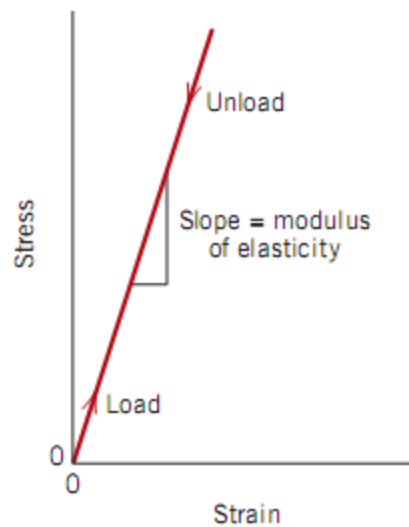


Figura 6.5 – Diagrama esquemático tensão deformação mostrando a deformação elástica

## DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

Quando um material é submetido a uma tensão o mesmo responderá com uma deformação conforme visto pelo ensaio de tração (Figura 6.4), inicialmente o material responde com deformações elásticas (deformações temporárias), mas conforme a tensão é aumentada o material passa por um ponto onde não responde mais com deformações elásticas. Na medida em que o material é deformado além deste ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação (lei de Hooke deixa de ser válida) e ocorre deformação permanente, não-recuperável, ou deformação plástica. Como podemos ver pela Figura 6.6, conforme carregado o material passa a responder, inicialmente, com deformações elásticas e posteriormente com deformações plásticas até chegar ao ponto de ruptura.

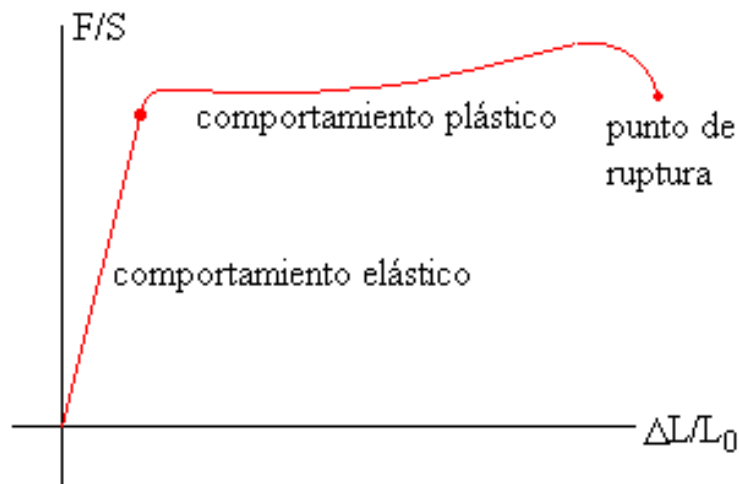


Figura 6.6 – Diagrama Tensão deformação típico para metais

De um ponto de vista atômico, deformação plástica corresponde ao rompimento das ligações com os átomos vizinhos e a seguir reformar as ligações com novos vizinhos, uma vez que grande número de átomos ou moléculas movem-se uma em relação a uma outra; após a remoção da tensão eles não se retornam mais às suas posições originais, esse fenômeno é conhecido como escoamento.

## 6.6 – PROPRIEDADES DE TRAÇÃO

### LIMITE DE ESCOAMENTO

Muitas estruturas são projetadas para assegurar que apenas deformação elástica resultará quando uma tensão for aplicada. É, portanto, desejável conhecer o nível de tensão no qual a deformação plástica começa, ou onde ocorre o fenômeno do escoamento. Para metais que experimentam esta gradual transição, o ponto de escoamento pode ser determinado como o desvio inicial a partir da linearidade da curva tensão-deformação; isto é às vezes denominado limite proporcional.

A magnitude do limite convencional de escoamento para um metal é justo uma medida de sua resistência à deformação plástica. Limites de escoamento podem variar desde 5000 psi (35 MPa) para uma liga de alumínio de baixa resistência até mais de 200000 psi (1400 MPa) para aços de alta resistência.

## LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO

Após o escoamento, a tensão necessária para continuar a deformação plástica cresce até um máximo, ponto M na Figura 6.4, e a seguir decresce até a fratura eventual, ponto F. O limite de resistência a tração é o valor máximo que pode ser atingido pelo gráfico, ou seja, o ponto M. Isto corresponde à tensão máxima que pode ser suportada por uma estrutura em tração; se esta tensão é aplicada e mantida, a fratura acontecerá. Toda deformação até este ponto é uniforme através de toda a região mais estreita da amostra de tração. Entretanto, nesta tensão máxima, uma pequena constricção ou pescoço começa a se formar em algum ponto e toda subsequente deformação é confinada neste pescoço, como indicado pelas amostras esquemáticas mostrada na Figura 6.4. Este fenômeno é denominado “enperscoçamento” e a fratura finalmente ocorre no pescoço. A resistência à fratura corresponde à tensão aplicada quando ocorre a fratura.

Os limites de resistência à tração podem variar desde 7000 psi (50 MPa) para um alumínio até um valor tão alto quanto 450000 psi (3000 MPa) para aços de alta resistência mecânica. Ordinariamente, quando a resistência mecânica de um metal é citada para propósitos de projeto, o limite convencional de elasticidade é usado. Isto é devido ao fato de que no tempo em que uma tensão correspondente ao limite de resistência à tração tenha sido aplicada, às vezes a estrutura terá experimentado tão grande deformação plástica que ela é inútil. Além disto, resistências à fratura não são normalmente especificadas para propósitos de projetos.

## DUCTILIDADE

Ductilidade é uma outra importante propriedade mecânica. Ela é uma medida do grau de deformação plástica que foi sustentada na fratura. Um material que experimenta muito pouca ou



nenhuma deformação plástica antes da fratura é denominado frágil. Os comportamentos de tensão de tração-deformação para materiais tanto dúcteis quanto frágeis são esquematicamente ilustrados na figura 6.7.

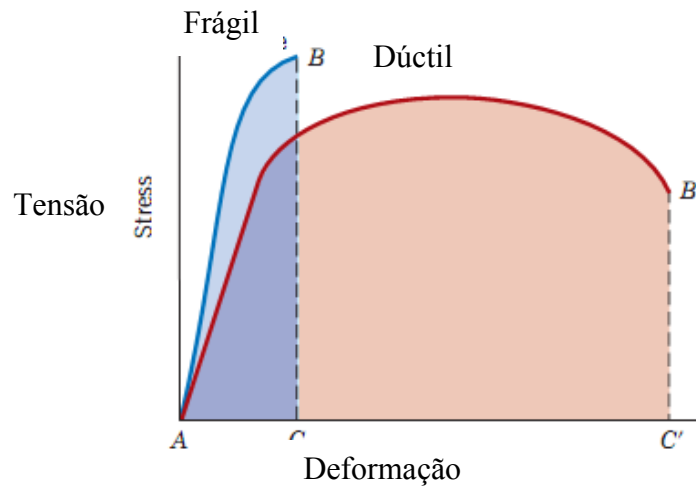


Figura 6.7 – Representação esquemática do diagrama tensão deformação para materiais frágeis e dúcteis

Um conhecimento da ductilidade dos materiais é importante por pelo menos 2 razões. Primeiro, ela indica ao projetista o grau até onde uma estrutura se deformará plásticamente antes da fratura. Segundo, ela especifica o grau de deformação permissível durante operações de fabricação.

## RESILIÊNCIA

Resiliência é a capacidade de um material tem em absorver energia quando ele é deformado elasticamente e então, no descarregamento, ter recuperada esta energia, ou seja, retornar ao estado inicial. Assim, materiais resiliêntes são aqueles tendo aos limites convencionais de elasticidade e baixos módulos de elasticidade; tais ligas seriam usadas em aplicações de molas.

## TENACIDADE

Tenacidade é um termo mecânico que é usado em vários contextos; falando de uma maneira liberal, é uma medida da capacidade de um material em absorver energia até a fratura. A geometria da peça bem como a maneira como é trabalhada são importantes nas determinações de tenacidade.

A tenacidade pode ser quantificada a partir dos resultados de um teste de tensão de tração deformação. É a área sob a curva até o ponto de fratura. Para um material ser tenaz, ele deve exibir tanto resistência mecânica quanto ductilidade; e às vezes, materiais dúcteis são mais tenazes do que outros materiais frágeis. Isto está demonstrado na Figura 6.7. A Figura mostra que mesmo que o material frágil tenha maior limite convencional de escoamento e maior limite de resistência à tração, em virtude de falta de ductilidade, ele tem uma menor tenacidade do que um material dúctil; isto é deduzido por comparação das áreas ABC e AB'C' na Figura 6.7.

## 6.7 – DUREZA

Outra propriedade mecânica importante que pode ser importante considerar é a dureza, que é uma medida da resistência de um material a ser deformado plasticamente em um local (por exemplo, uma pequena impressão ou um risco). Os primeiros testes de dureza eram baseados em minerais naturais, onde uma escala era construída somente com base na capacidade de um material riscar outro que é mais macio.

Técnicas quantitativas para determinação da dureza foram desenvolvidas ao longo dos anos, nas quais um pequeno penetrador é forçado contra a superfície de um material a ser testado, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação. Faz-se a medida da profundidade ou do tamanho da penetração resultante; quanto mais macio for o material, maior e mais profunda será a impressão resultante e menor será a sua dureza.

Os ensaios de dureza são realizados com mais frequência do que qualquer outro ensaio mecânico por várias razões. Os testes de dureza são mais simples e mais baratos, normalmente o corpo de prova não precisa ser preparado e o mesmo não é fraturado, ou seja, o ensaio não é destrutivo e os equipamentos para a realização do ensaios são relativamente mais baratos.

A escala de dureza pode ser dada em várias unidades, dependendo de como é feito o teste. As unidades de dureza mais utilizadas são:

- Dureza Rockwell

Onde uma esfera de aço com 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 pol de diâmetro e um cone de diamante é utilizado para provocar a penetração no material testado

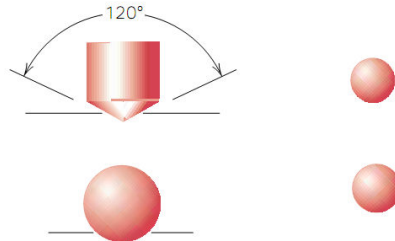


Figura 6.8 – Esferas e cone utilizados no ensaio de dureza Rockwell

- Dureza Brinell

Nos ensaios de dureza Brinell, como nas medições Rockwell, um penetrador esférico e duro é forçado contra a superfície do metal a ser testado. O diâmetro do penetrador de aço endurecido ou de carboneto de tungstênio é de 10mm (0,394pol).

- Microdureza Knoop e Vickers

Para um ensaio, um penetrador de diamante muito pequeno, com geometria piramidal, é forçado contra a superfície do corpo de prova. A impressão deixada pelo ensaio é observada sob um microscópio e medida.



Figura 6.9 – Penetradores utilizados nos ensaios de dureza Knoop e Vickers

## EXERCÍCIOS

- 4) Fale um pouco sobre a importância do estudo das propriedades mecânicas de materiais. Como essas propriedades são determinadas?
- 5) Fale quais as maneiras de aplicação de carga em peças.
- 6) Como é feito um teste de tração, qual se obtém de um teste como esse. Qual a importância desse teste?
- 7) Fale sobre as deformações elásticas e plásticas. Desenhe uma diagrama tensão deformação e situe a zona elástica e plástica.
- 8) O que é limite de escoamento e limite de resistência a tração.
- 9) Fale sobre ductilidade.
- 10) Qual a diferença entre tenacidade e resiliência?
- 11) Conceitue dureza em um contexto mecânico. Como é feito um teste de dureza? Quais as principais unidades de dureza?

## 7 – TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS

### 7.1 – TRANSFORMAÇÕES – CURVA TTT

A formação de ferrita e da perlita são processos difusionais onde ocorre nucleação e crescimento. Se resfriarmos uma amostra de um aço eutetóide desde de 1000° C (região austenítica) até uma temperatura abaixo de 727° C, haverá a formação de perlita. Obviamente essa transformação não será instantânea, pois como o processo é difusional haverá um tempo de incubação para os átomos se rearranjarem e formarem os primeiros núcleos, estes começarão a crescer e a austenita vai se transformando em perlita. Finalmente os nódulos de perlita se tocam e esse impedimento físico faz com que a transformação ocorra mais lentamente em sua forma final.

Tomando-se outra amostra do aço eutetóide e transformando-a em uma temperatura acima de 727° C e resfriarmos até uma temperatura abaixo de 727° C, teremos que o passar o tempo, haverá a formação gradual de austenita em perlita, ou seja, teremos uma relação de formação de perlita pelo tempo.

Unindo-se os tempos de início de transformação para as várias temperaturas teremos uma curva em “C”, de início de formação da perlita. A curva obtida é chamada TTT (tempo – temperatura – transformação).

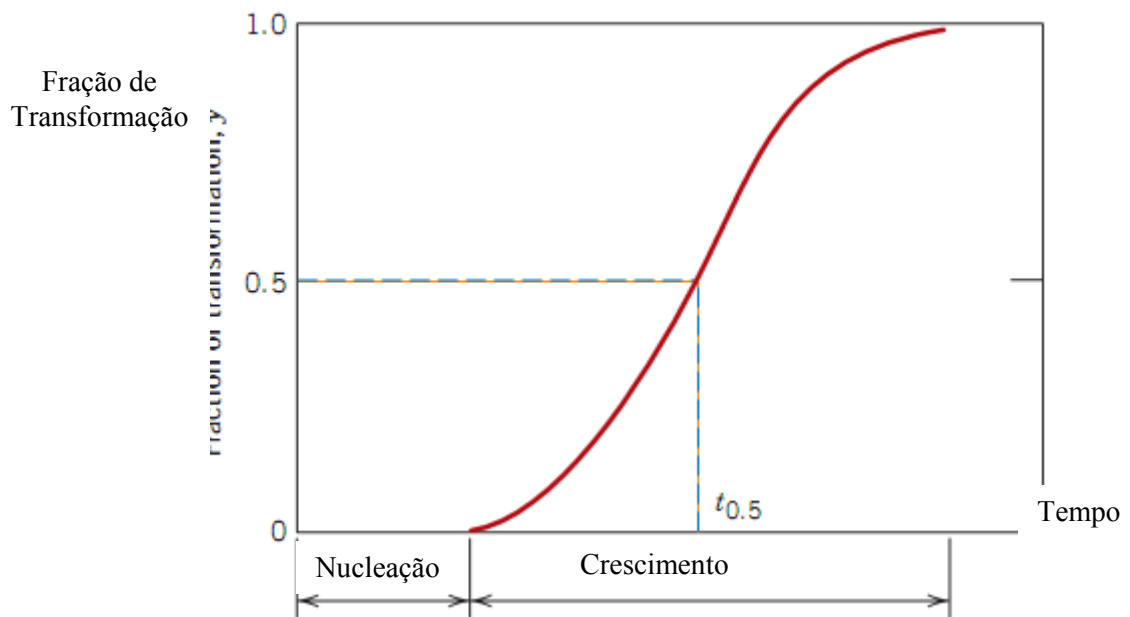


Figura 7.1 – Gráfico da fração de transformação em função do tempo, curva “C”

Em um diagrama TTT completo de um aço eutetóide observa-se que para uma transformação eutetóide de austenita (A) em perlita (P) os alguns constituintes não previstos pelo diagrama de fases ferro carbono podem ser formados, que são a bainita (B) e a martensita (M), como pode ser mostrado na Figura 7.2. Estes constituinte serão analisados a seguir.

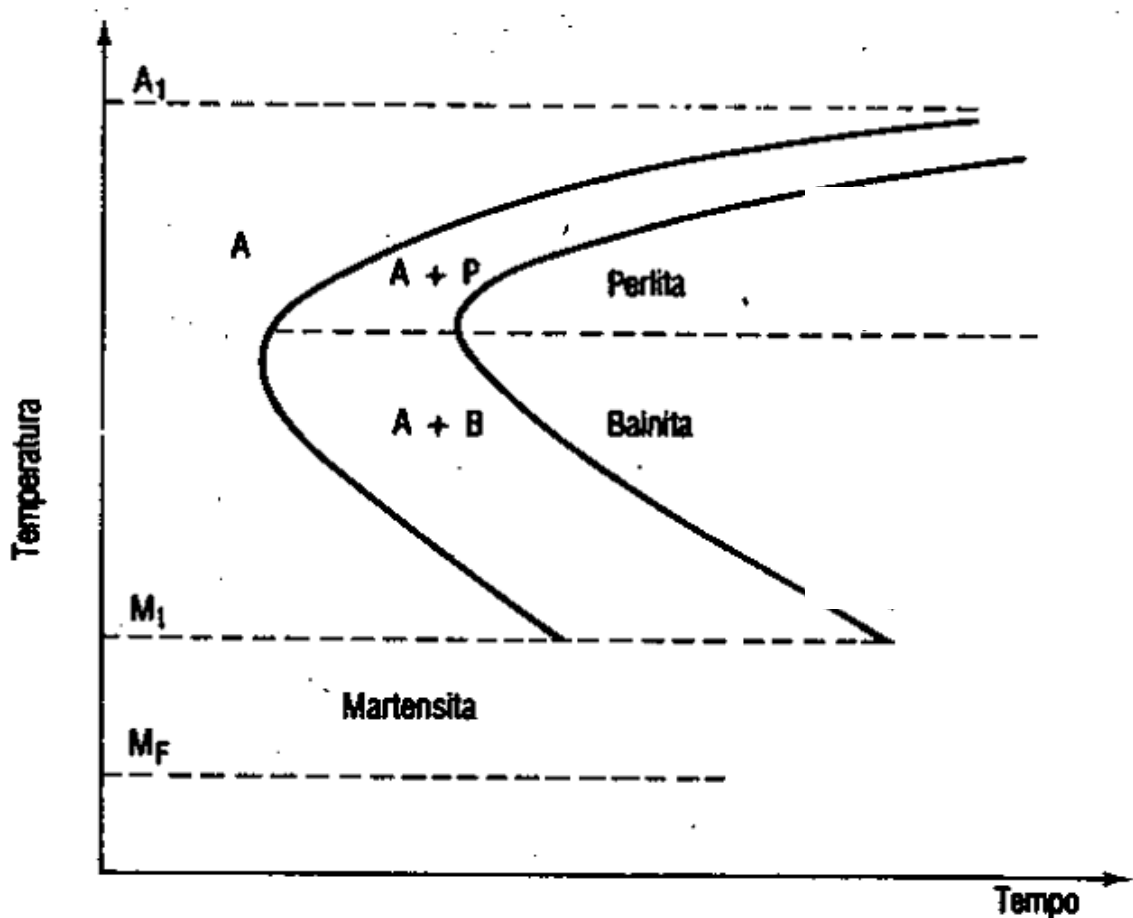


Figura 7.2 – Representação de uma curva TTT para um aço eutetóide

## BAINITA

Quando um aço carbono é resfriado rapidamente para temperaturas abaixo da curva TTT e mantido nessa temperatura, ocorre a formação de uma estrutura denominada bainita.

A bainita é classificada de superior ou inferior de acordo com a temperatura na qual é formada.

A bainita superior é formada por finas ripas de ferrita com cementita precipitada no contorno das ripas. Em aços com baixo carbono a cementita ocorre na forma isolada ou em fileiras descontínuas ao longo do contorno das ripas, e em aços com alto carbono, essas fileiras podem tornar-se contínuas.

A bainita inferior é formada em regiões próximas a da martensita, apresentando-se na forma lenticular (ou de agulhas), parecida com a martensita. Essas agulhas nucleiam no contorno e no interior do grão austenítico, com agulhas secundárias formadas a partir das agulhas primárias.

## MARTENSITA

A martensita é uma fase metaestável que aparece como o resfriamento brusco da austenita, como por exemplo, resfriando-se uma amostra austenitizada em água. Assim, a transformação ocorre por cisalhamento da estrutura, sem difusão. A martensita é uma estrutura monofásica que não se encontra em equilíbrio. Quando é feita a transformação de austenita para martensita todos os átomos de carbono permanecem como impurezas na martensita; como tal, eles constituem uma solução sólida capaz de se transformar rapidamente em outras estruturas, se aquecidos nas quais a taxa de difusão sejam possíveis.

Uma vez que a transformação martensítica não envolve difusão, ela ocorre quase instantaneamente; os grãos de martensita nucleiam e crescem a uma taxa muito rápida, equivalente à velocidade do som na estrutura. A Figura abaixo mostra uma microestrutura martensítica.



Figura 7.3 - Martensita



## 7.2 – TRATAMENTOS TÉRMICOS

Operações de aquecimento e resfriamento controlados, que visam afetar características de aços e ligas especiais, são denominados tratamentos térmicos.

Aços e ligas especiais são submetidos a diversos tratamentos térmicos, com vistas à otimização de suas propriedades. Enquanto alguns tipos de tratamentos se aplicam a ampla gama de aços e ligas, outros têm sua aplicação restrita a determinadas famílias de aços ou ligas.

Os tratamentos térmicos dos aços especiais englobam uma das mais amplas faixas de temperatura dentre os processos industriais, variando desde tratamentos com temperaturas abaixo de 0° C até austenitização de aços rápidos, a 1280 ° C. Além disso, diversas taxas de resfriamento são empregadas, visando permitir a obtenção da exata estrutura desejada. É claro que para realização destes tratamentos são necessários fornos e outros aparatos auxiliares.

Os principais tratamentos térmicos abordados neste capítulo são:

- Reozimento
- Normatização
- Têmpera
- Revenimento

Os três primeiros envolvem transformações de fase a partir da austenita. Obviamente, às diversas estruturas possíveis de se obter na transformação de austenita estão associadas a diferentes propriedades, desde o máximo de ductilidade e mínimo de dureza, característico das estruturas ferríticas, até elevados valores de dureza e menor ductilidade associados à martensita.

## 7.2.1 – RECOZIMENTO

O recozimento visa reduzir a dureza do aço, aumentar a usinabilidade, facilitar o tratamento a frio. Existem, basicamente, dois tipos principais de recozimento:

- Recozimento pleno
- Recozimento subcrítico/alívio de tensões

### **Recozimento Pleno**

Consiste em austenitizar o aço aquecendo-o a temperaturas acima da sua temperatura de austenitização e resfriando-o lentamente a seguir. Deve-se preferir temperaturas de austenitização mais altas quando se deseja estrutura perlítica.

Nos casos em que o tempo de transformação for excessivo nesta temperatura, pode-se transformar parcialmente a alta temperatura seguido do restante de transformação à baixa temperatura. Há portando, duas possibilidades de transformação da austenita

1. Transformação Isotérmica
2. Resfriamento contínuo, normalmente no interior do forno.

A Figura 7.4 mostra as duas formas de resfriamento mostradas citadas acima.

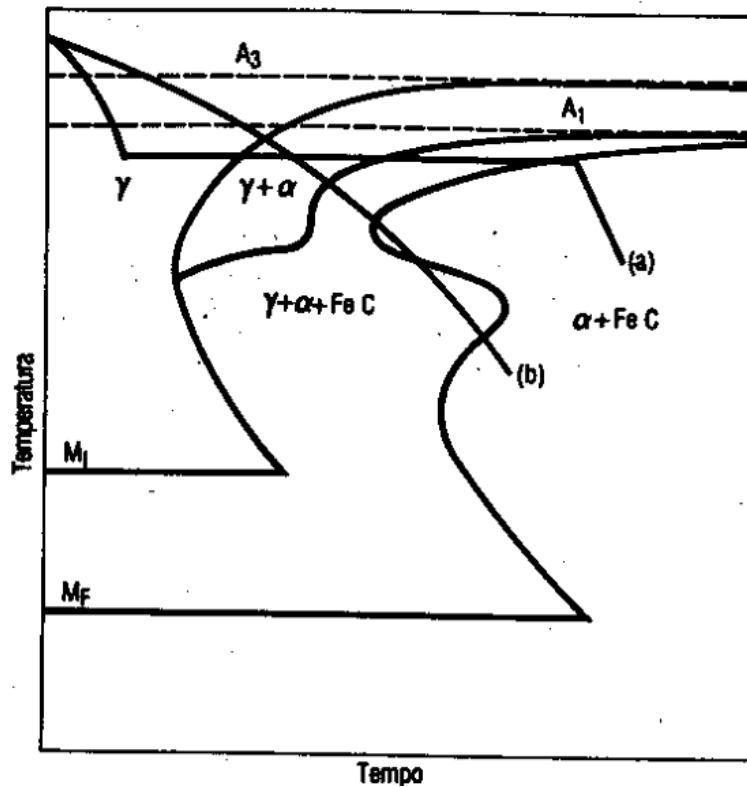


Figura 7.4 – (a) Transformação isotérmica, (b) Resfriamento contínuo

### Recozimento Subcrítico / Alívio de Tensões

No recozimento subcrítico o aquecimento se dá a uma temperatura abaixo da temperatura de austenitização. O recozimento subcrítico é usado para recuperar a ductilidade do aço trabalhado a frio (encruados). Quando se executam operações de deformação a frio, a dureza aumenta e ductilidade diminui, podendo ocorrer ruptura. Normalmente o aquecimento do aço carbono é na faixa de 600 a 680° C, seguindo de resfriamento ao ar. Tratamentos de alívio de tensões também são aplicados quando se deseja reduzir tensões residuais em estruturas ou componentes após soldagem, fabricação etc.

## 7.2.2 – NORMALIZAÇÃO

A normalização consiste na austenitização completa do aço, seguida de resfriamento ao ar. É indicada normalmente para homogeneização da estrutura após forjamento e antes da têmpera ou revenimento.

Comparando-se a estrutura normalizada com a recozida para um aço hipoeutetóide tem-se, na normalizada em termos de propriedades mecânicas a dureza e a resistência mecânica mais elevadas, ductilidade mais baixa e resistência ao impacto semelhante. Para aços hipereutetóides, distribuição uniforme dos carbonetos existentes, devido à dissolução mais completa dos carbonetos na austenitização para a normalização do que para o recozimento. A normalização pode ser usada para melhorar a usinabilidade e o trabalho a quente.

## 7.2.3 – TÊMPERA

Uma das características mais importantes dos aços como materiais de construção mecânica é a possibilidade de desenvolver combinação ótimas de resistência e tenacidade (medida pela resistência ao impacto). A estrutura que classicamente permite tais combinações é a estrutura martensítica revenida.

A têmpera consiste em resfriar o aço, após austenização, a uma velocidade suficientemente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainíticas na peça. Desse modo, obtém-se estruturas metaestável martensítica.

Como os diferentes aços apresentam curvas TTT diferentes, a taxa mínima de resfriamento necessário para temperar um material pode variar bastante. Na Figura 7.5 e 7.6, por exemplo, são apresentadas as curvas TTT de dois aços com diferentes características de transformações de fase. Enquanto no aço 4340 as transformações perlíticas e bainíticas têm seu início retardado pela presença de elementos de liga, facilitando a têmpera, no aço 1050 é mais difícil obter-se estruturas 100% martensítica mesmo com resfriamento extremamente rápido.

Para se aumentar a temperabilidade do aço, deve-se retardar a formação de ferrita, cementita, perlita e bainita, ou seja, deve-se deslocar a curva TTT para tempos mais longos, isso pode ser feito dissolvendo elementos de liga no aço.

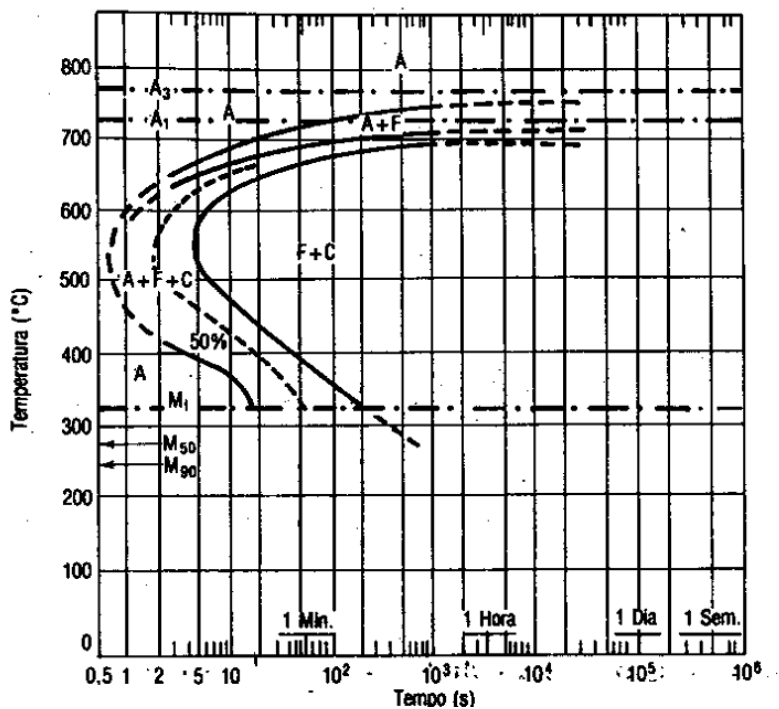


Figura 7.5 – Gráfico TTT para um aço 1050

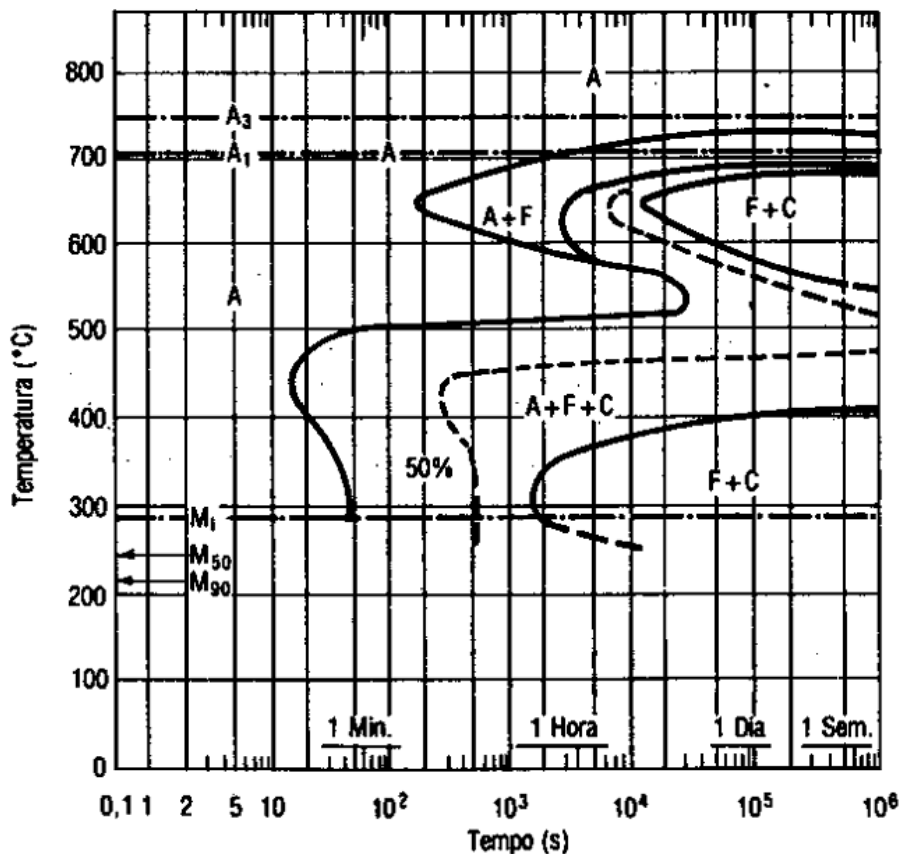


Figura 7.6 – Gráfico TTT para um aço 4340

Para o controle da taxa de resfriamento utilizam-se diversos meios de têmpera, com diferentes capacidades de extração de calor (resfriamento). Os meios de têmpera mais comuns são: água, óleo e ar, embora outros meios líquidos ou gasosos possam ser empregados.

Enquanto no recozimento não se encontram tensões residuais nas peças durante o resfriamento, a severidade com que este ocorre na têmpera faz surgir bastantes tensões no interior do material. Dependendo da magnitude das tensões resultantes podem ocorrer: deformações plásticas (empeno da peça) e ruptura (trincas de têmpera).

## 7.2.4 – REVENIMENTO

No estado como temperado, martensita, além de ser muito dura, é tão frágil que ela não pode ser usada para a maioria das aplicações; também, quaisquer tensões internas que possam ter sido introduzidas durante a têmpera tem um efeito enfraquecedor. Peças deixadas permanecem nesta condição de alto tensionamento externo correm grande risco de trincas.

Para se atingir valores adequados de resistência mecânica e tenacidade deve-se, logo após a têmpera, proceder ao revenimento. Este tratamento consiste em aquecer uniformemente até uma temperatura abaixo daquela de austenitização (250 a 600° C), mantendo o aço nesta temperatura por tempo suficiente para equalização de temperatura e obtenção das propriedades desejadas, Figura 7.7. A estrutura resultante do revenimento em aços temperados é a martensita revenida.

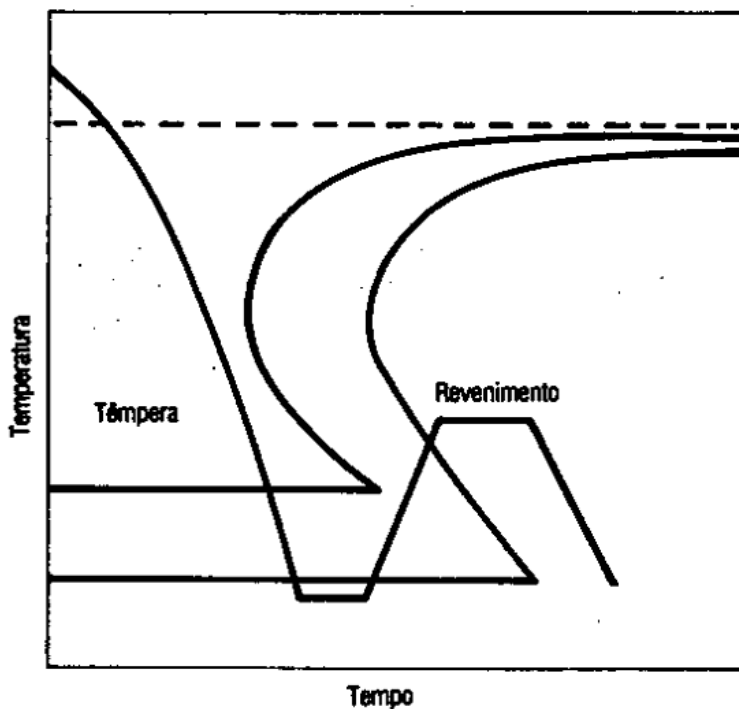


Figura 7.7 – Ciclo de têmpera mais revenimento.

## MARTENSITA REVENIDA

Martensita revenida pode ser aproximadamente tão dura e tão forte quanto à martensita, mas apresentado valores de ductilidade e tenacidade maiores. A dureza e a resistência mecânica podem ser explicadas pela grande área de contorno de fases entre ferrita e cementita por unidade de volume que existe para partículas de cementita muito finas e numerosas. A cementita dura reforça a matriz de ferrita ao longo dos contornos de grão e estes contornos de grão também agem como barreiras para o movimento de discordâncias durante a deformação plástica.

O tamanho das partículas de cementita influencia as propriedades mecânicas da martensita revenida; o aumento do tamanho de partícula decresce a área do contorno de fase ferrita-cementita e, conseqüentemente, resulta num material mais macio e mais fraco que é ainda um mais tenaz e mais dúctil. Além disso, o tratamento térmico de revenimento determina o tamanho das partículas de cementita.. A Figura 7.8 mostra uma micrografia de uma martensita revenida.

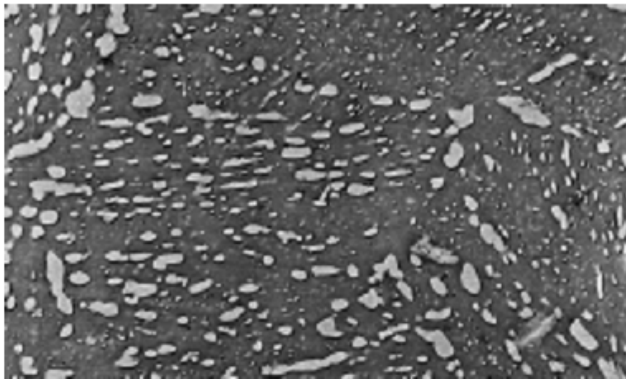


Figura 7.8 – Martensita Revenida

### 7.2.4 – MARTÊMPERA

Visando diminuir parcialmente o problema das tensões de resfriamento na têmpera, desenvolveu-se o tratamento de martêmpera. Na martêmpera, o resfriamento é interrompido por alguns instantes a uma temperatura superior a de início de transformação martencítica ( $M_1$ ), de modo a eliminar ou diminuir os gradientes térmicos, prosseguindo em seguida para a formação de martensita, Figura 7.9. Para a realização de martêmpera é necessário um conhecimento adequado das características de transformação (curvas TTT) do aço.

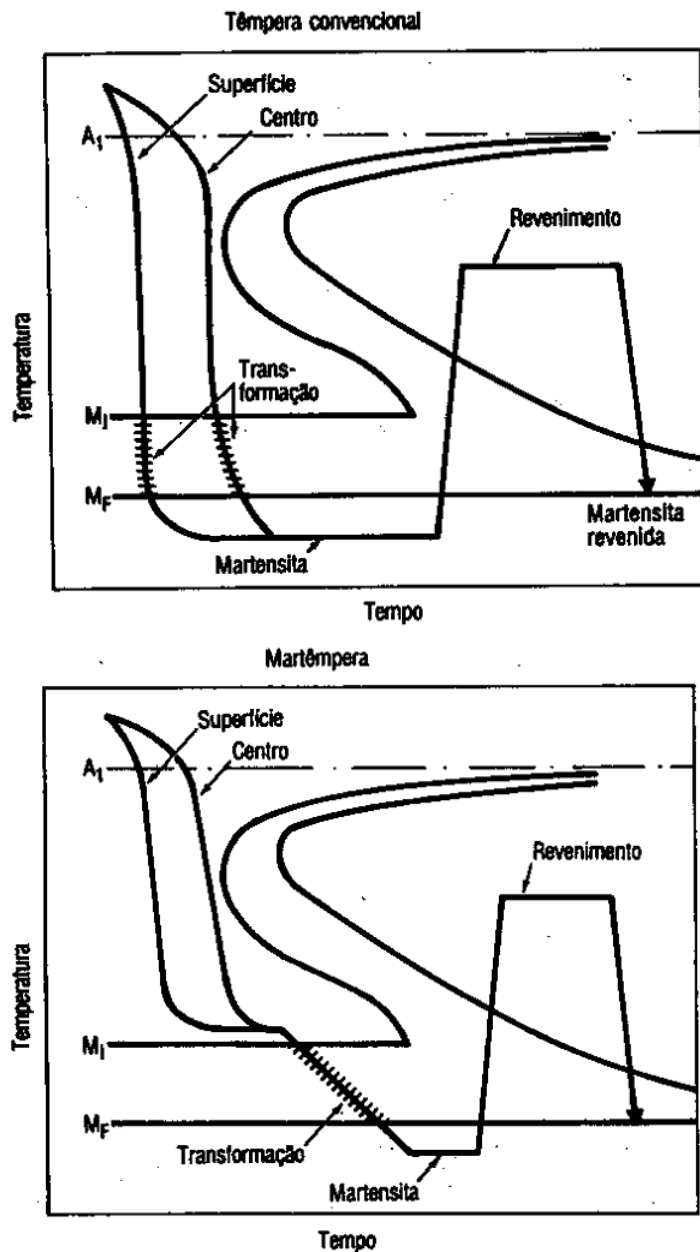


Figura 7.9 – Comparação entre o tratamento de têmpera e martêmpera

A martêmpera emprega banho de sal ou banho de óleo para realizar o resfriamento, Tabela 7.1. A martêmpera permite um maior controle dimensional sobre os lotes de peças do que a têmpera convencional. Também ocorre uma menor perda de peças por trincas e empenos. A desvantagem da martêmpera sobre a têmpera convencional é que seu custo é maior.



Tabela 7.1 – Temperaturas e modo de resfriamento para alguns aços.

Aço (ABNT/AISI)	Temperatura (°C)		
	Austenitização	Martêmpera	
		Óleo	Sal
1024	870	135	----
1070	845	175	----
1146	815	175	----
1330	845	175	----
4063	845	175	----
4130	845	175	200 - 260
4140	830	----	230 – 270
8740	830	----	230 – 270

### 7.2.5 – AUSTÊMPERA

Austêmpera é uma transformação isotérmica para produção de estrutura bainítica, Figura 7.10. O processo consiste em:

1. Austenitizar o aço
2. Resfriamento rápido em banho de sal, óleo ou chumbo.
3. Transformação da austenita em bainita.
4. Resfriamento ao ar até a temperatura ambiente

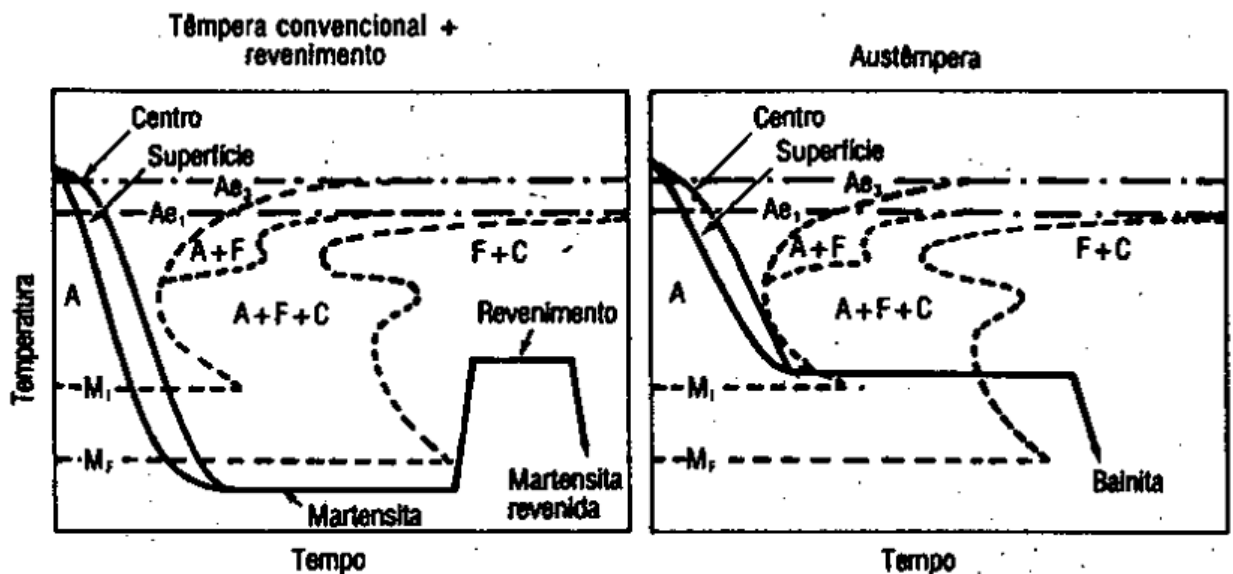


Figura 7.10 – Comparação entre o tratamento de têmpera e austêmpera

O principal objetivo da austêmpera é obter produtos com alta ductilidade e resistência ao impacto, sem perda expressiva de dureza. Outro objetivo é reduzir a perda por trincas e empenos, e melhorar a precisão dimensional.

O custo da austêmpera é aproximadamente o mesmo que o da têmpera + revenimento, e em alguns casos é até menor, quando, por exemplo, se tratar de pequenas peças em produção. A grande desvantagem é que o processo, devido às duas características, é limitado a um grupo pequenos de aço: 1050, 1095, 1350, 4063, 4150, 4365, 5140, 5160, 8750, dentre os mais comuns.

### 7.3 – TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS

Tratamentos termoquímicos são processos que visam à adição por difusão, de carbono, nitrogênio ou boro na superfície na superfície do aço. Como a difusão desses elementos nos aços só é significativa em altas temperaturas (500 a 1000°C), o tratamento é denominado termoquímico.

O objetivo principal é aumentar a dureza e a resistência ao desgaste da superfície, ao mesmo tempo em que o núcleo do material se mantém dúctil.

Os processos utilizados são:

- Cementação
- Nitretação
- Cianetação

- Carboretação
- Boretação

Os fatores que influenciam no controle do processo são:

- Potencial do meio, em que a peça está imersa (sólido, líquido ou gasoso) para a realização do tratamento de fornecer o elemento químico.
- Capacidade da peça de absorver este elemento químico. Isto está relacionada com a solubilidade e difusão do elemento químico no aço.

## 7.3.1 – CEMENTAÇÃO

Consiste na introdução de carbono na superfície de aço, de modo que este, depois de tratado apresente uma superfície mais dura. Para se produzir uma combinação de uma superfície dura com núcleo tenaz, deve-se partir de um aço com baixo carbono e aquecê-lo, geralmente, entre 815 a 950°C.

A cementação pode ser feita por via:

- Sólida
- Gasosa
- Líquida

### CEMENTAÇÃO SÓLIDA

As peças de aço são acondicionadas em caixas metálicas de aço baixo carbono ou de aço inoxidável, onde se adiciona carvão de madeira ou coque, ativador (carbonato de bário e/ou de sódio) e um óleo ligante. A camada cementada varia de 0,6 a 6mm dependendo das condições de tempo e temperatura empregadas. Essa profundidade, na prática, é medida através da dureza.

Vantagens:

- Pode utilizar uma grande variedade de fornos e não precisa de atmosfera controlada
- É econômica para pequenos lotes de peças, ou peças muito grandes.
- Exige uma menor experiência do operador.

## Desvantagens

- Não é indicada para camadas finas que devem ser controladas dentro de uma tolerância estreita.
- Difícil controle de carbono na superfície.
- As taxas de aquecimento e resfriamento são mais lentas devido à inércia térmica da caixa e do material cementante.

## CEMENTAÇÃO GASOSA

Consiste em se colocar a peça a ser cementada em um forno com atmosfera de potencial de carbono controlado. O gás utilizado é geralmente o gás natural (80 a 90% de  $\text{CH}_4$  e 10 a 20% de  $\text{C}_2\text{H}_6$ ), o propano( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), o butano( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), e mais recentemente o álcool etílico volatilizado ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ ). A camada cementada varia de 0,5 a 2,0mm, usualmente, e depende, além do tempo e da temperatura, do potencial de carbono no forno.

## Vantagens:

- Processo mais limpo que por via sólida.
- Melhor controle de teor de carbono e da espessura da camada cementada.
- Processo rápido e apto a produção contínua.

## Desvantagens

- Custo alto dos equipamentos.
- Requer pessoal habilitado.

## CEMENTAÇÃO LÍQUIDA

Consiste em se manter o aço em um banho de sal fundido numa temperatura de 840 a 900°C. A profundidade da camada cementada depende da composição do banho e principalmente da temperatura utilizada. As camadas podem variar de 0,08 a 3,0mm. O processo ocorre de forma muito rápida, comparados a cementação líquida e sólida.

Vantagens:

- Obtenção de apreciáveis profundidades de penetração em tempo relativamente curto.
- Possibilidade de operação contínua, pela colocação ou retirada das peças, enquanto outras ainda estão em tratamento.

Desvantagens:

- Necessidade de limpeza posterior em alguns casos.

### 7.3.2 – NITRETAÇÃO

Nitretação é o processo de introdução superficial de nitrogênio no aço, pelo aquecimento do mesmo entre 500 a 570°C, para formar uma camada dura de nitretos. A resistência ao desgaste aumenta consideravelmente após a nitretação das peças. A nitretação aumenta também a resistência à fadiga.

Por utilizar temperaturas menores que as da cementação, a nitretação tem menor tendência a causar trincas no material.

As principais razões para se utilizar a nitretação são:

- Obter altíssima dureza superficial e alta resistência ao desgaste.
- Melhorar a resistência à fadiga e à corrosão.

A nitretação pode ser feita a gás, ou em banho líquido.

## NITRETAÇÃO A GÁS

Consiste em submeter a peça a uma atmosfera de amônia, entre 500 e 550°C. Basicamente são empregados aços que contém elementos formados de nitretos como alumínio, cromo e vanádio. Durante a nitretação ocorre um ligeiro aumento dimensional das peças e isto deve ser levado em conta no projeto das mesmas.

## NITRETAÇÃO LÍQUIDA

O aquecimento é feito na mesma faixa de temperatura da nitretação a gás, utilizado um banho a cianetos. Os aços empregados são: carbono, ferramenta, inoxidável e resistente ao calor. A grande vantagem sobre a nitretação a gás é que, além de utilizar aço carbono, os tempos são bem menores. A desvantagem é que a camada nitretada também é menor, de 0,015 contra 0,7mm na nitretação a gás.

### 7.3.3 – CIANETAÇÃO

Consiste em aquecer o aço em temperaturas que variam de 760 a 870°C, em um banho de sal fundido, de modo que a superfície do aço absorva carbono e nitrogênio. A cianetação produz uma camada dura e resistente ao desgaste.

As profundidades de penetração do carbono e do nitrogênio e, por consequência, a dureza, variam com a temperatura e com o tempo, variando de 0,006 a 0,15mm

## 7.3.4 – CARBONITRETAÇÃO

Também conhecido como cianetação seca, cianetação a gás ou nitrocarbonetação, é um processo de introduzir carbono e nitrogênio no aço a partir de uma mistura gasosa apropriada. O carbono provem de um gás rico em carbono e o nitrogênio a partir de amônia. É um processo misto da cementação a gás e a nitretação a gás, sendo realizadas em temperaturas intermediárias entre dois processos (700 a 900°C).

O objetivo da carbonitretação é formar no aço uma camada resistente ao desgaste de 0,07 a 0,7mm. Por empregar temperaturas menores que a cementação gasosa, produz um menor nível de tensões na peça.

A resistência à fadiga e ao impacto são maiores em peças carbonitretadas do que nas cementadas a gás. Em contrapartida a profundidade da camada endurecida é menor que na cementação. A carbonitretação também é mais limpa que a cianetação a gás, assim, em peças com formas complicadas ou com pequenos furos a operação de retirada do sal da cianetação é difícil, e aí a carbonitretação é mais indicada.

## 7.3.4 – BORETAÇÃO

Consiste no enriquecimento superficial em boro no aço pela difusão química, com formação de boretos de ferro. A boretação pode ser gasosa, líquida ou sólida. A boretação gasosa, além de utilizar equipamentos de alto custo, emprega gases muitos venenosos. Na boretação líquida utiliza banhos de sais, não tóxicos, mas apresenta dificuldades de introdução do boro no aço por formar camadas contendo boro e ferro. Em vista disso, a boretação sólida tem sido mais empregada. Os meios de boretação sólida podem conter como fontes de boro as seguintes substâncias: boro puro, ferro-boro, e carboneto de boro. A espessura da camada boretada é muito fina, embora processos especiais permitam obter camadas de até 1 milímetro de profundidade. A temperatura de boretação varia de 800 a 1050°C e os tempos em geral, variam de 1 a 8 horas.

A camada boretada é extremamente dura, apresentando, também, uma grande resistência à corrosão. Os aços empregados na boretação são: aço carbono, ferramenta e inoxidável.

## EXERCÍCIOS

- 1) Fale sobre a estrutura bainítica, como e por que ela é formada? Comente sobre os tipos de bainita.
- 2) O que é um tratamento térmico?
- 3) Quais os principais tipos de tratamentos térmicos?
- 4) Fale sobre o recozimento.
- 5) Como proceder para normalizar um aço? Fale sobre as propriedades mecânicas depois da normalização.
- 6) Fale sobre a têmpera. Qual estrutura é obtida depois de temperar um aço? Essa estrutura tem aplicação prática? Por que depois da têmpera é normalmente feito o revenimento?
- 7) Desenhe um gráfico TTT mostrando uma têmpera seguida de revenimento. Qual estrutura é formada ao fim desses dois tratamentos térmicos?
- 8) Diferencie martêmpera de austêmpera.
- 9) Fale sobre os tratamentos termoquímicos, quais os principais tipos?
- 10) Fale sobre a cementação e diferencie em sólida líquida e gasosa.
- 11) Fale sobre a nitretação e diferencie entre seus dois tipos.
- 12) Diferencie cianetação, carbonitretação e boretação.



## 8 – CORROSÃO DE METAIS

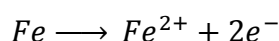
### 8.1 – INTRODUÇÃO

Em maior ou menor, um grande número de materiais experimentam algum tipo de interação com um grande número de ambientes diversos. Às vezes, tais interações prejudicam a utilidade de um material como um resultado da deterioração de suas propriedades mecânicas (por exemplo, ductilidade e resistência), outras propriedades físicas, ou aparência.

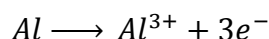
Corrosão é definida como um ataque destrutivo e não intencional de um metal; esse ataque é eletroquímico e, normalmente, tem seu início na superfície do material. O problema de corrosão metálica é de proporções significativas; em termos econômicos, tem-se estimado que aproximadamente 5% da renda de indústrias são gastos na prevenção da corrosão e na manutenção ou substituição dos produtos perdidos ou contaminados como um resultado de reações de corrosão. As consequências da corrosão são totalmente muito comuns. Exemplos familiares incluem a ferrugem nas carrocerias, radiadores e dos componentes de exaustão (canos de descarga).

### 8.2 – CONSIDERAÇÕES ELETROQUÍMICAS

Para materiais metálicos, o processo de corrosão é normalmente eletroquímico, isto é, uma reação química na qual existe a transferência de elétrons a partir de um componente químico para outro. Átomos metálicos caracteristicamente perdem ou cedem elétrons na que é chamada uma reação de oxidação. Por exemplo, o metal Fe (ferro), que tem uma valência 2 (ou 2 elétrons de valência) pode experimentar oxidação de acordo com a reação:

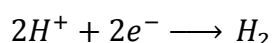


Outro exemplo é o Al (alumínio), que tem uma valência de 3 (ou 3 elétrons de valência) pode experimentar oxidação de acordo com a reação:



O material onde a oxidação ocorre é chamado de anodo; a oxidação é algumas vezes chamada de reação anódica.

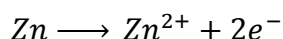
Os elétrons gerados a partir de cada átomo de metal que é oxidado devem ser transferidos para outro componente químico da qual fará parte, numa reação que é chamada reação de redução. Por exemplo, alguns metais sofrem corrosão em soluções ácidas, que têm uma alta concentração de íons hidrogênio ( $H^+$ ); os íons hidrogênio são reduzidos como se segue a reação:



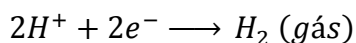
O componente onde ocorre a reação de redução é chamado de catodo.

Uma reação eletroquímica global deve consistir de pelo menos uma reação de oxidação e uma reação de redução e será a soma delas; às vezes as reações de oxidação e de redução são denominadas meias-reações. Não poderá haver nenhum acúmulo de carga dos elétrons e dos íons; isto é, a taxa total de oxidação deve ser igual à taxa total de redução, ou os elétrons gerados através de oxidação devem ser consumidos por redução.

Por exemplo, considere-se o zinco metálico imerso numa solução ácida contendo íons  $H^+$ . Em algumas regiões na superfície do metal, zinco experimentará oxidação ou corrosão como ilustrado na Figura 8.1, de acordo com a reação:



Uma vez que o zinco é um metal, e portanto é um bom condutor, estes elétrons podem ser transferidos a uma região adjacente onde os íons  $H^+$  estão sendo reduzidos de acordo com a equação:



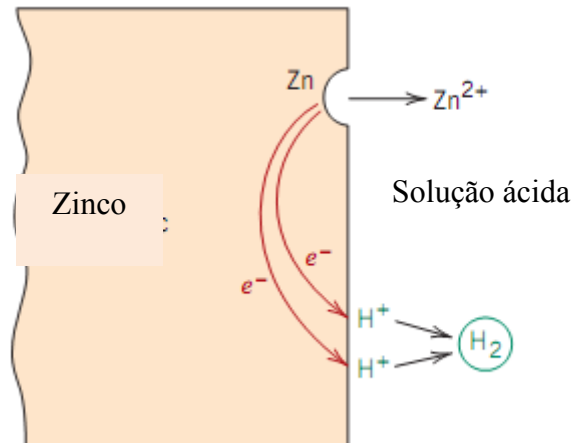
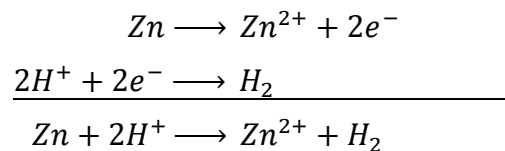
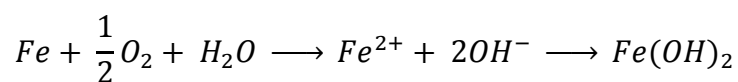


Figura 8.1 – Reação eletroquímica associada com a corrosão do zinco

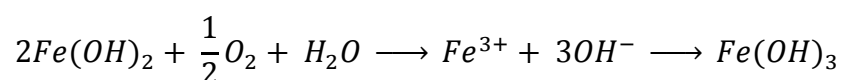
A reação eletroquímica total será somente a soma das reações de oxidação e redução



Um outro exemplo é a oxidação do ferro na água (ferrugem), a qual contém oxigênio dissolvido. Esse processo ocorre em duas etapas; na primeira etapa o Fe é oxidado a  $Fe^{2+}$  [como  $Fe(OH)_2$ ].



Na segunda etapa ele é oxidado a  $Fe^{3+}$  [como  $Fe(OH)_3$ ], de acordo com a reação



**POTENCIAIS DE ELETRODO**

Nem todos os materiais metálicos oxidam para formar íons com o mesmo grau de facilidade. Considere-se a célula eletroquímica mostrada na figura 8.2. No lado esquerdo se encontra um eletrodo de ferro puro imersa numa solução rica em íons  $Fe^{2+}$ . No outro lado da célula se encontra um eletrodo de cobre puro numa solução rica em íons  $Cu^{2+}$ . As soluções estão separadas por uma membrana, que limita a mistura das duas soluções. Se os eletrodos de ferro e de cobre estiverem conectados eletricamente, uma reação de redução ocorrerá para o cobre e uma reação de oxidação ocorrerá no eletrodo de ferro, como segue:

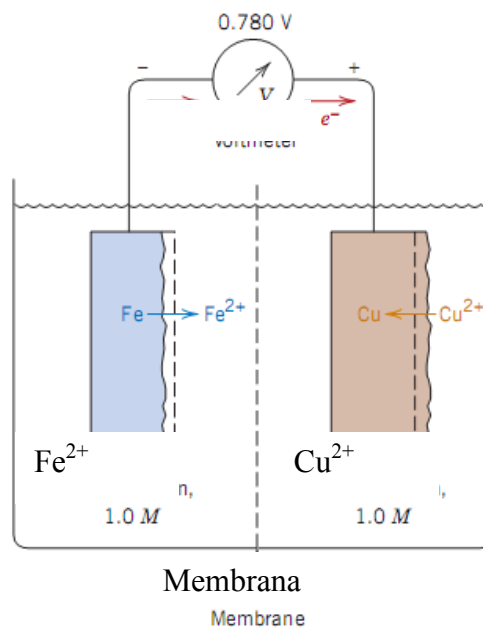
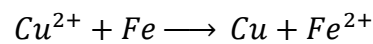
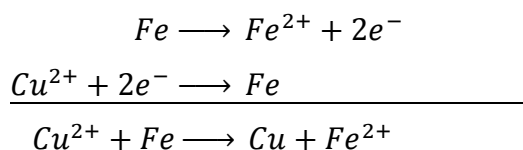


Figura 8.2 – Pilha eletroquímica que consiste em eletrodos de ferro e cobre.

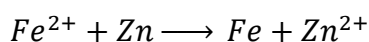
Os íons  $Cu^{2+}$  se depositarão na forma de cobre metálico sobre o eletrodo de cobre, enquanto que ferro se dissolve (corrói-se) no outro lado da célula e na solução como íons  $Fe^{2+}$ . Assim as duas reações de meia-célula são representadas pelas relações:



Quando uma corrente passa através do circuito externo, elétrons gerados a partir da oxidação do ferro se escoam à célula de cobre a fim de reduzir os íons  $Cu^{2+}$ . Além disso, existirá um movimento líquido de íon de um lado da célula para o outro através da membrana. Isto é chamado um par galvânico, isto é, dois metais eletricamente conectados num eletrólito líquido dentro do qual um metal se torna anodo e se corrói, enquanto que o outro age como um catodo.

Um potencial elétrico ou voltagem existirá entre as duas meias-células e sua magnitude pode ser determinada se um voltímetro for conectado ao circuito externo. Um potencial de 0,780V resulta a partir de uma célula galvânica cobre-ferro, esta voltagem pode mudar de acordo com a temperatura da célula.

Considere-se agora um par galvânico consistindo da mesma meia-célula conectada a um eletrodo de zinco metálico que é imerso numa solução rica em íons  $Zn^{2+}$  (Figura 8.3). Neste caso, o zinco é o anodo e se corrói, enquanto que agora o Fe se torna catodo. A reação eletroquímica ocorre na seguinte reação:



O potencial associado com a reação desta célula é 0,323V.

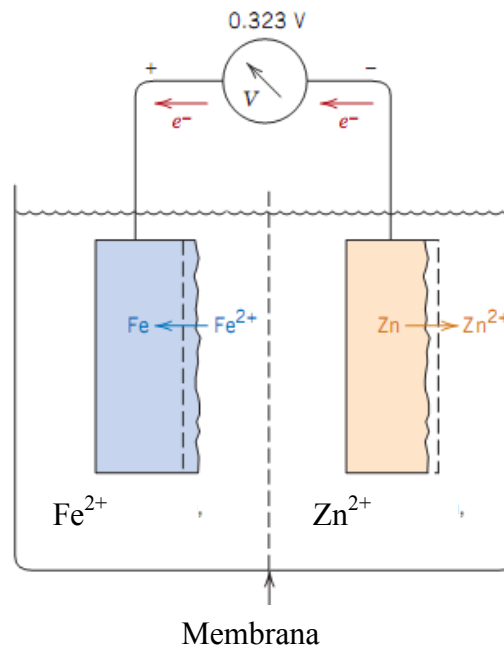


Figura 8.3 – Pilha eletroquímica que consiste em eletrodos de ferro e zinco.

Assim vários pares de eletrodo têm diferentes voltagens; a magnitude de uma voltagem pode ser pensada como representando a força motriz para a reação eletroquímica de oxidação-redução. Conseqüentemente, materiais metálicos podem ser colocados em posições relativas entre si quanto às suas tendências para experimentar oxidação quando postas fazendo pares com outros metais.

### **A SÉRIE DE POTENCIAIS DE ELETRODO PADRÃO**

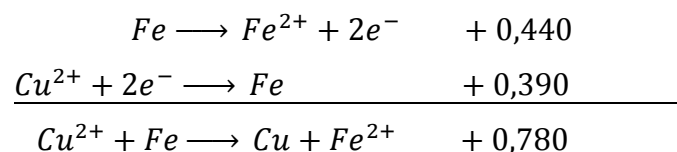
Estas medidas de voltagens da célula representam apenas diferenças em potencial elétrico, assim é conveniente estabelecer um ponto de referência, ou célula de referência, ao qual outras meias-células possam ser comparadas. Esta célula de referência, arbitrariamente escolhida, é o eletrodo padrão de hidrogênio. Ela consiste de um eletrodo inerte de platina numa solução rica em íons  $H^+$ . A platina em si não toma parte na reação eletroquímica; ela age apenas como uma superfície na qual átomos de hidrogênio podem ser oxidados ou íons de hidrogênio podem ser reduzidos. A série de forças eletromotrizes (Tabela 8.1) é gerada pelo acoplamento das meias-

células padrões dos vários metais ao eletrodo padrão de hidrogênio e o ordenamento deles de acordo com a voltagem medida. A Tabela 8.1 representa as tendências à corrosão para os vários metais; aqueles do topo (por exemplo, ouro e a platina) são nobres, ou quimicamente inertes. Movendo-se para baixo na tabela, os metais se tornam cada vez mais ativos, mais susceptíveis à oxidação, o sentido da reação é revertido e o sinal da voltagem mudado

Tabela 8.1 – Série de potenciais de eletrodos padrões

	Reação do eletrodo	Potencial do eletrodo (V)
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;">           Progressivamente            mais inerte            (cátodo)         </div>	$Au^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow Au$	+1.420
	$O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} \longrightarrow 2H_2O$	+1.229
	$Pt^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Pt$	~+1.2
	$Ag^{+} + e^{-} \longrightarrow Ag$	+0.800
	$Fe^{3+} + e^{-} \longrightarrow Fe^{2+}$	+0.771
	$O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \longrightarrow 4(OH^{-})$	+0.401
	$Cu^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Cu$	+0.340
	$2H^{+} + 2e^{-} \longrightarrow H_2$	0.000
	$Pb^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Pb$	-0.126
	$Sn^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Sn$	-0.136
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;">           Progressivamente            mais ativo            (anódico)         </div>	$Ni^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Ni$	-0.250
	$Co^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Co$	-0.277
	$Cd^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Cd$	-0.403
	$Fe^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Fe$	-0.440
	$Cr^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow Cr$	-0.744
	$Zn^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Zn$	-0.763
	$Al^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow Al$	-1.662
	$Mg^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Mg$	-2.363
	$Na^{+} + e^{-} \longrightarrow Na$	-2.714
	$K^{+} + e^{-} \longrightarrow K$	-2.924

Considere as reações abaixo, já mostradas anteriormente, envolvendo oxidação de Fe e redução do Cu. Se procurarmos na Tabela 8.1 encontraremos o potencial de cada eletrodo, como mostrado na equação abaixo:



Note que o potencial da reação com o Fe recebe um sinal positivo, isso se deve ao fato que na Tabela 8.1 os potenciais elétricos mostrados se referem a reações de redução e a reação

experimentada pelo Fe é de oxidação (inverso da reação de redução), assim o sinal do potencial é invertido.

Para que a reação ocorra espontaneamente, o valor do potencial deve ser positivo; se ele for negativo, a reação se torna não espontânea. Quando semipilhas padrões são acopladas entre si, o metal que está localizado mais baixo na Tabela 8.1 irá experimentar oxidação (isto é, corrosão), enquanto o que está mais acima sofrerá redução.

## EXEMPLO 8.1

Metade de uma pilha eletroquímica consiste em um eletrodo de níquel (Ni) imerso em uma solução rica em  $\text{Ni}^{2+}$ ; a outra metade é composta por um eletrodo de cádmio imerso em uma solução de  $\text{Cd}^{2+}$ . Escreva as reações de redução e oxidação e a reação global e calcule a voltagem que é gerada. A reação é espontânea?

## 8.3 – EFEITOS DO AMBIENTE

As variáveis do ambiente de corrosão incluem velocidade de fluido, temperatura e composição, pode ter influência decisiva sobre as propriedades de corrosão dos materiais que estão em contato com esse ambiente. Na maioria das situações, aumento da velocidade de fluido melhora da taxa de corrosão devido aos efeitos erosivos. As taxas de muitas reações químicas aumentam com o aumento da temperatura; isto também vale para a grande maioria de situações de corrosão. O aumento da concentração das espécies de corrosão (por exemplo íons  $\text{H}^+$  em ácidos) em muitas situações produz uma maior taxa de corrosão.

Trabalho a frio ou a deformação plástica de metais dúcteis é usada para aumentar a sua resistência mecânica; entretanto, um metal trabalhado a frio é mais susceptível à corrosão do que o mesmo material em um estado recozido. Por exemplo, processos de deformação são usados para conformar a cabeça e a ponta de um prego; conseqüentemente, estas posições são anódicas com



respeito à região intermediária do prego. Assim trabalho a frio diferencial numa estrutura deve ser considerado quando um ambiente corrosivo é encontrado durante o serviço.

## 8.4 – FORMAS DE CORROSÃO

É conveniente classificar corrosão de acordo com a maneira na qual ela se manifesta. Corrosão metálica é geralmente classificada em oito diferentes formas:

- Uniforme;
- Galvânica;
- Em frestas;
- Por pites ou localizada;
- Intergranular;
- Por lixíviação seletiva;
- Erosão-corrosão;
- Corrosão sob tensão.

### ATAQUE UNIFORME

Ataque uniforme é uma forma de corrosão eletroquímica que ocorre com intensidade equivalente ao longo de toda superfície exposta e às vezes deixa para trás uma carepa ou um depósito. Num sentido microscópico, as reações de oxidação e redução ocorrem uniformemente ao longo da superfície. Alguns exemplos familiares incluem a ferrugem geral de aços e do ferro e o escurecimento e perda do brilho das pratarias. Esta é provavelmente a forma mais comum de corrosão. Pode ser prevista e levando em conta em projeto com relativa facilidade.

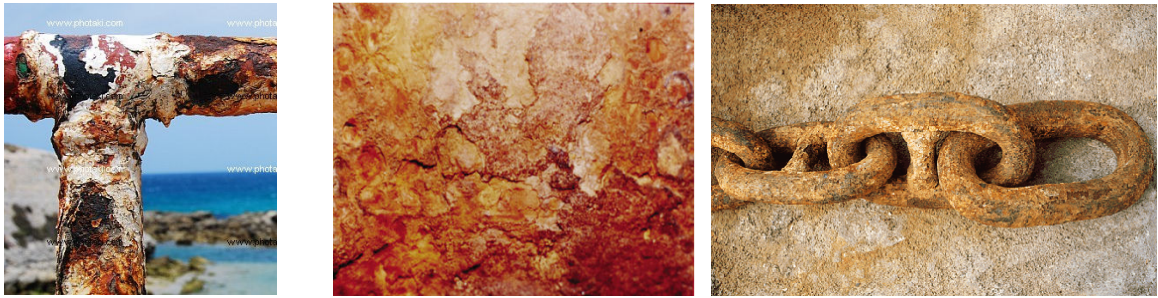


Figura 8.4 – Exemplos de corrosão uniforme

**Prevenção e Controle:** Dependendo do grau de deterioração da peça, pode-se apenas realizar uma limpeza superficial com jato de areia e renovar a pintura antiga. Em corrosões avançadas, deve-se optar pelo reforço ou substituição dos elementos danificados.

Em qualquer caso é preciso à limpeza adequada da superfície danificada. A corrosão uniforme pode ser evitada com a inspeção regular da estrutura e com o uso de ligas especiais como o aço inoxidável. Sua localização é uma das mais simplificadas e permite que problemas sejam evitados quando se existe serviços de manutenção preventiva.

## CORROSÃO GALVÂNICA

Corrosão galvânica ocorre quando dois metais ou ligas tendo diferentes composições são postos em contato, em ambiente propício. O metal menos nobre e mais reativo, o ânodo, no particular ambiente experimentará corrosão; o metal mais inerte, o catodo, será protegido em relação à corrosão. Por exemplo, parafusos de aço se corroem quando em contato com latão num ambiente marinho; ou se tubos de cobre e aço forem juntados num aquecedor doméstico de água, o aço se corroerá na vizinhança da junção.



Figura 8.5 – Exemplo de corrosão galvânica

**Prevenção e Controle:** Ela é evitada através do isolamento dos metais ou da utilização de ligas com valores próximos na série de potenciais (Tabela 8.1).

Uma forma muito utilizada é a proteção catódica, que consiste em fazer com que os elementos estruturais se comportem como cátodos com o uso de metais de sacrifício. Dessa forma, a estrutura funcionará como agente oxidante e receberá corrente elétrica do meio, não perdendo elétrons para outros metais.

## CORROSÃO EM FRESTAS

Ocorre em locais que duas superfícies estão em contato ou muito próximas (0,025 a 0,1 mm).

Devido à tensão superficial da água, esta se aloja nas fendas disponíveis e tende a causar pilhas, onde a concentração de oxigênio nas bordas é superior à concentração da área mais interna da fenda, fazendo dessa uma região anódica. Como consequência, o processo de corrosão se concentra na parte mais profunda da fresta, dificultando o acesso e o diagnóstico desse problema.

Em geral, esse problema afeta somente pequenas partes da estrutura, sendo portanto mais perigosa do que a corrosão uniforme, cujo alarme é mais visível.



Figura 8.6 – Exemplo de corrosão em frestas

**Prevenção e Controle:** Se a corrosão estiver em estágio inicial, pode-se recorrer à limpeza superficial, secagem do interior da fenda e vedação com um líquido selante, aplicando-se posteriormente um revestimento protetor. Se a corrosão estiver em nível avançado, torna-se necessário como nos outros processos o reforço ou substituição de peças.

Corrosão por diferença de concentração pode ser prevenida pelo uso juntas soldadas em vez de juntas rebitadas ou aparafusadas, pelo uso de gaxetas não absorventes quando possível, removendo com frequência os depósitos acumulados e projetando vasos recipientes de tal maneira a evitar áreas estagnantes e assegurando completa drenagem da água.

## PITES OU LOCALIZADA

Corrosão localizada pontual é outra forma de ataque de corrosão localizada na qual covas ou buracos se formam. O material é penetrado do topo de uma superfície horizontal para baixo numa direção praticamente vertical. É um tipo de corrosão extremamente traiçoeira, muitas vezes indo sem ser detectada e com muito pouca perda de material até que a falha ocorra. Aços inoxidáveis são algo susceptíveis a esta forma de corrosão; entretanto, a adição de cerca de 2% de molibdênio ao aço melhora sua resistência significativamente.



Figura 8.7 – Exemplo de corrosão localizada

**Prevenção e Controle:** Para se evitar esse ataque, as peças não devem acumular substâncias na superfície e todos os depósitos encontrados devem ser removidos durante as manutenções. A intervenção deve ser realizada com base no estado em que o processo corrosivo se encontra. Deve-se efetuar a limpeza no local e se a estrutura não estiver comprometida, pode-se cobrir o furo aplicando sobre ele um selante especial. É importante a experiência do fiscal devido à possibilidade de se necessitar de uma intervenção mais complexa, com reforço da estrutura ou até mesmo substituição de peças.

## CORROSÃO INTERGRANULAR

Como o nome sugere, corrosão intergranular ocorre preferencialmente ao longo dos contornos de grão para algumas ligas em ambientes específicos. O resultado é que uma amostra macroscópica se desintegra ao longo dos seus contornos de grão. Este tipo de corrosão é especialmente predominante em alguns aços inoxidáveis. Quando aquecido até temperaturas entre 500 e 800°C por tempo suficientemente longo, estas ligas se tornam sensíveis ao ataque intergranular.

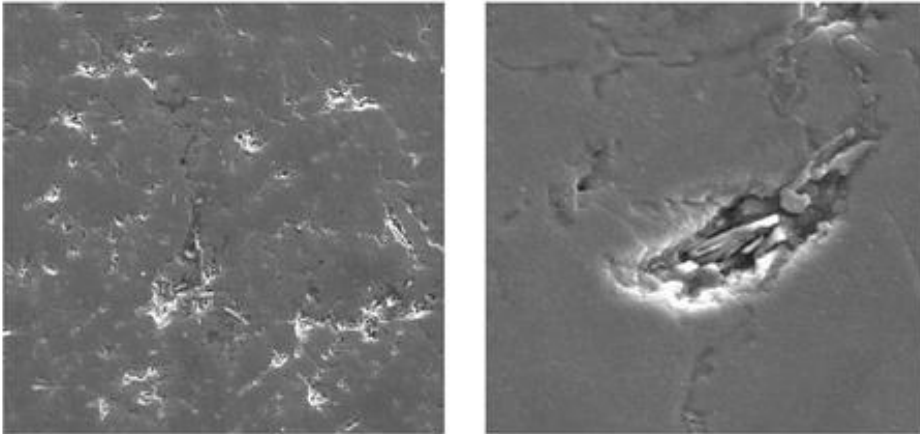


Figura 8.8 – Exemplo de corrosão intergranular

**Prevenção e Controle:** Aços inoxidáveis podem ser protegidos contra corrosão intergranular pelas seguintes medidas: (1) submetendo o material sensitizado a tratamento térmico de alta temperatura, (2) abaixamento do teor de carbono abaixo de 0,03%C e (3) adição no aço inoxidável de outros elementos de liga, tais como nióbio ou titânio.

## LIXÍVIAÇÃO SELETIVA

Lixiviação seletiva é encontrada em ligas de solução sólida e ocorre quando um elemento ou constituinte é preferencialmente removido como uma consequência do processo de corrosão. O exemplo mais comum é o deszincamento do latão, no qual zinco é seletivamente lixiviado a partir de uma liga de latão cobre-zinco. As propriedades mecânicas da liga são significativamente prejudicadas, de vez que apenas uma massa porosa de cobre remanesce na região que foi deszincada. Em adição, o material muda de amarelo para uma cor vermelha ou de cobre. Lixiviação seletiva pode também ocorrer com outros sistemas de ligas nos quais alumínio, ferro, cobalto, cromo e outros elementos são vulneráveis a uma remoção preferencial.





Figura 8.9 – Exemplo de corrosão por lixiviação seletiva

## EROSÃO-CORROSÃO

Erosão-corrosão surge da ação combinada de ataque químico e desgaste mecânico como uma consequência de movimento de um fluido. Naturalmente todas as ligas metálicas, em maior ou menor grau, são susceptíveis à erosão-corrosão. Ela é especialmente nociva ou prejudicial a ligas que são passivadas pela formação de um filme superficial protetor; a ação abrasiva pode remover por erosão o filme, deixando exposta a superfície nua do metal. Se o revestimento não for capaz de se reformar continuamente e rapidamente como uma barreira protetora, corrosão pode ser severa. Metais relativamente macios tais como cobre e chumbo são às vezes sensíveis a esta forma de ataque. Usualmente ela pode ser identificada por ranhuras e ondas superficiais tendo contornos que são característicos de escoamento de fluido.



Figura 8.10 – Exemplo de corrosão por erosão-corrosão

A natureza do fluido pode ter uma influência dramática sobre o comportamento de corrosão. O aumento da velocidade do fluido normalmente melhora a taxa de corrosão. Também, uma solução é mais erosiva quando contiver bolhas e partículas sólidas em suspensão.

Erosão-corrosão é comumente encontrada em tubulações, especialmente em joelhos, cotovelos e mudanças abruptas de diâmetro onde a direção do fluido muda ou o escoamento repentinamente se torna turbulento. Propulsores, lâminas de turbina, válvulas e bombas são susceptíveis a esta forma de corrosão.

**Prevenção e Controle:** Uma das melhores maneiras de reduzir a erosão-corrosão é mudar o projeto para eliminar a turbulência do fluido. Podem também ser utilizados outros materiais que sejam inerentemente resistentes à erosão. Além disso, remoção de partículas e bolhas a partir da solução diminuirá a sua capacidade de erosão.

## CORROSÃO SOB TENSÃO

Corrosão sob tensão, às vezes denominado trincamento por corrosão sob tensão, resulta a partir da ação combinada de uma tensão de tração aplicada e de um ambiente corrosivo; ambas as influências são necessárias. De fato, alguns materiais virtualmente inertes num particular corrosivo se tornam susceptíveis a esta forma de corrosão quando uma tensão for aplicada. Pequenas trincas se formam e a seguir se propagam numa direção perpendicular à da tensão resultado disto podendo



ser a ocorrência da falha. Além disto, trinca podem ser formar em níveis de tensão relativamente baixos, significativamente abaixo do limite de resistência à tração. Muitas ligas são susceptíveis à corrosão sob tensão em ambientes específicos, especialmente em moderados níveis de tensão. Por exemplo, a maioria dos aços inoxidáveis correm sob tensão em soluções contendo íons cloreto, enquanto que latões são especialmente vulneráveis quando expostos à amônia.



Figura 8.11 – Exemplo de corrosão sob tensão

**Prevenção e Controle:** Provavelmente a melhor medida para reduzir ou eliminar totalmente a corrosão sob tensão é abaixar a magnitude da tensão. Isto pode ser realizado pela redução da carga externa ou aumento da secção reta perpendicular à tensão aplicada. Além disso, um apropriado tratamento térmico pode ser usado para aliviar quaisquer tensões térmicas residuais.

## 8.4 – AMBIENTES DE CORROSÃO

Ambientes corrosivos incluem a atmosfera, soluções aquosas, solos, ácidos, bases, solventes orgânicos, sais fundidos, metais líquidos e o corpo humano. Em termos de perdas, a corrosão atmosférica responde pelas maiores. Umidade contendo oxigênio dissolvido é o agente corrosivo principal, mas outras substâncias, incluindo compostos de enxofre e cloreto de sódio, também podem contribuir. Isto é especialmente verdadeiro em atmosferas marinhas, que são altamente corrosivas por causa da presença do cloreto de sódio. Soluções diluídas de ácido sulfúrico (chuva ácida) em ambientes industriais podem também causar problemas de corrosão. Metais

comumente usados para aplicações atmosféricas incluem ligas de alumínio e cobre, e o aço galvanizado.

Ambientes de água também podem ter uma variedade de composições e de características de corrosão. Água fresca normalmente contém oxigênio dissolvido, bem como outros minerais vários dos quais responsáveis pela dureza da água. Água marinha contém aproximadamente 3,5% de sal (predominantemente cloreto de sódio), bem como alguns minerais e matéria orgânica. Água do mar é geralmente mais corrosiva do que água fresca, frequentemente produzindo corrosão localizada pontual e corrosão por diferença de concentração. Ferro fundido, aço, alumínio, cobre e alguns aços inoxidáveis são geralmente adequados para uso em água fresca, enquanto que titânio, latão, alguns bronzes, ligas cobre-níquel e ligas níquel -cromo-molibdênio são altamente resistentes à corrosão em água do mar.

Solos têm uma larga faixa de composições e susceptibilidades à corrosão. Variáveis composicionais incluem umidade, oxigênio, teor de sal e acidez, bem como a presença de várias formas de bactéria. Ferro fundido e aços carbono comuns, ambos com e sem revestimentos superficiais protetores, são mais econômicos para estruturas subterrâneas. Uma vez que existem um demasiado grande número de ácidos, bases e solventes orgânicos, nenhuma tentativa é feita para discutir estas soluções. São disponíveis boas referências tratando estes tópicos em detalhe.

## 8.5 – PREVENÇÃO DA CORROSÃO

Alguns métodos de prevenção de corrosão foram tratados em relação às 8 formas de corrosão; entretanto, apenas medidas específicas de cada um dos vários tipos de corrosão foram discutidos. Agora, algumas das técnicas mais gerais são apresentadas; estas incluem seleção de material, alteração ambiental, projeto, revestimentos e proteção catódica.

Talvez o mais comum e mais fácil meio de prevenir corrosão é através da seleção cautelosa de materiais uma vez que o ambiente de corrosão tenha sido caracterizado. Aqui, custo pode ser um fator significativo. Nem sempre é economicamente viável empregar o material que oferece a resistência à corrosão ótima; às vezes, uma outra liga e/ou alguma outra medida deve ser usada.

Mudança do caráter do ambiente, se possível, pode também influenciar significativamente a corrosão. O abaixamento da temperatura e/ou velocidade do fluido usualmente produz uma redução na taxa de ocorrência da corrosão. Muitas vezes o aumento ou o decréscimo da concentração de algumas espécies na solução terá um efeito positivo.

Inibidores são substâncias que, quando adicionadas em relativamente baixas concentrações ao ambiente, diminuem a taxa de corrosão. Naturalmente, o inibidor específico depende tanto da liga quanto do ambiente corrosivo. Inibidores são normalmente usados em sistemas fechados tais como radiadores de automóveis e caldeiras de vapor d'água.

Vários aspectos a serem considerados no projeto já foram discutidos, especialmente em relação às corrosões galvânicas e por diferença de concentração, bem como erosão-corrosão.

Barreiras podem ser postas para a prevenção da corrosão são aplicadas sobre superfícies na forma de filmes e revestimentos. Uma grande diversidade de materiais de revestimentos metálicos e não-metálicos estão disponíveis. Em muitos casos, o revestimento deve ser inerte a ação do ambiente corrosivo e resistente a dano mecânico que exponha o metal ao ambiente corrosivo.

## PROTEÇÃO CATÓDICA

Um dos meios mais efetivos de prevenção da corrosão é a proteção catódica; ela pode ser usada para todas as 8 diferentes formas de corrosão, em algumas situações, interrompe completamente a corrosão.

Proteção catódica simplesmente envolve suprimento, a partir de uma fonte externa (material de sacrifício) de elétrons para o metal a ser protegido, tornando-o um catodo. Uma técnica de proteção catódica emprega um par galvânico: o metal a ser protegido é eletricamente conectado ao um outro metal que é mais ativo no particular ambiente. O último experimenta oxidação e, ao ceder elétrons, protege o primeiro metal em relação à corrosão. O metal oxidado é chamado um anodo de sacrifício, o magnésio e o zinco são comumente usados como tal porque eles ficam na extremidade anódica da série de potencial (Tabela 8.1). Esta forma de proteção galvânica, inibe a corrosão no material que se quer proteger.

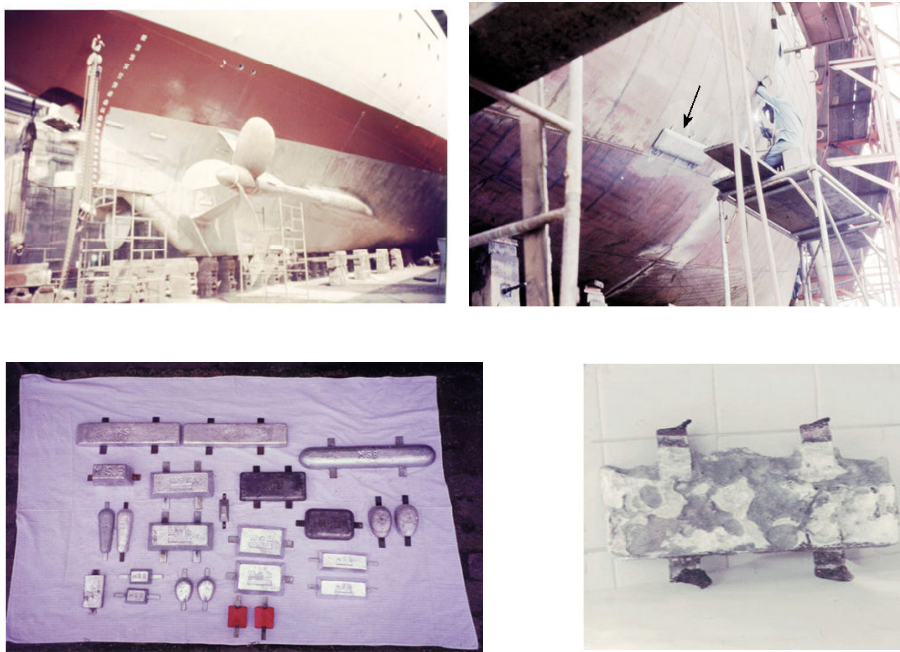


Figura 8.12 – Exemplo de corrosão em proteção catódica

O processo de galvanização é simplesmente um no qual uma camada de zinco é aplicada à superfície de um aço por mergulho a quente (Figura 8.13). Na atmosfera e em muitos ambientes aquosos, o zinco é anódico em relação ao aço e assim catodicamente protegerá o aço se houver qualquer dano à superfície do mesmo. Qualquer corrosão do revestimento de zinco procederá numa taxa extremamente baixa porque a taxa da área de superfície anodo para catodo é bastante grande.



Figura 8.13 – Imersão de peças em uma cuba com zinco à temperatura entre 430 a 470°C.

## EXERCÍCIOS

- 1) Defina corrosão e a importância de estudá-la.
- 2) O que é um processo eletroquímico?
- 3) Fale sobre as reações anódicas, cite exemplos.
- 4) Fale sobre as reações catódicas, cite exemplos.
- 5) Metade de uma pilha eletroquímica consiste em um eletrodo de Prata (Pt) imerso em uma solução rica em  $Pt^{2+}$ ; a outra metade é composta por um eletrodo de ferro imerso em uma solução de  $Fe^{2+}$ . Escreva as reações de redução e oxidação e a reação global e calcule a voltagem que é gerada.
- 6) Metade de uma pilha eletroquímica consiste em um eletrodo de cromo (Cr) imerso em uma solução rica em  $Cr^{2+}$ ; a outra metade é composta por um eletrodo de zinco (Zn) imerso em uma solução de  $Zn^{2+}$ . Escreva as reações de redução e oxidação e a reação global e calcule a voltagem que é gerada.
- 7) Quais são as oito diferentes formas de corrosão?
- 8) Escolha duas formas de corrosão, que você acredite ser mais importantes, e fale sobre, comente a forma de prevenção para essas formas.
- 9) Como o ambiente pode influenciar a corrosão?
- 10) Existem várias formas de prevenção da corrosão, uma das mais utilizadas e eficientes é a proteção catódica, comente sobre esse tipo de proteção.
- 11) Fale sobre o processo de galvanização.