



Ciência dos Materiais

Volume Único

Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila



GOVERNO DO ESTADO
RIO DE JANEIRO
Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação

**UNIVERSIDADE
ABERTA DO BRASIL**

MINISTÉRIO DA
EDUCAÇÃO



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

Apoio:



FAPERJ

Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo
à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro

Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

www.cederj.edu.br

Presidente

Carlos Eduardo Bielschowsky

Vice-presidente

Marilvia Dansa de Alencar

Coordenação do Curso de Engenharia de Produção

CEFET - Diego Carvalho

UFF - Cecília Toledo Hernández

Material Didático

Elaboração de Conteúdo

Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila

Direção de Design Instrucional

Bruno José Peixoto

Coordenação de Design Instrucional

Flávia Busnardo da Cunha

Design Instrucional

Lívia Tafuri

Luciana Brito

Renata Vettoretti

Paula Barja

Biblioteca

Simone da Cruz Correa de Souza

Vera Vani Alves de Pinho

Diretoria de Material Impresso

Ulisses Schnaider

Revisão Linguística

Elisa Silveira

José Meyohas

Lícia Matos

Mariana Caser

Rosane Lira

Ilustração

Vinicius Mitchell

Capa

Vinicius Mitchell

Programação Visual

Mario Lima

Núbia Roma

Produção Gráfica

Fábio Rapello Alencar

Copyright © 2019, Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

Nenhuma parte deste material poderá ser reproduzida, transmitida e/ou gravada, por qualquer meio eletrônico, mecânico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização, por escrito, da Fundação.

A958c

Ávila, Nadja Vasconcellos de.

Ciência dos materiais. Volume único / Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila. – Rio de Janeiro : Fundação Cecierj, 2019.

266p.; 19 x 26,5 cm.

ISBN: ***-**-***-****-*

1. Ciência dos materiais. 2. Organização atômica. 3. Propriedades mecânicas dos materiais. I. Título.

CDD: 620.11

Referências Bibliográficas e catalogação na fonte, de acordo com as normas da ABNT.
Texto revisado segundo o novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa.

Governo do Estado do Rio de Janeiro

Governador

Wilson Witzel

Secretário de Estado de Ciência, Tecnologia e Inovação

Leonardo Rodrigues

Instituições Consorciadas

CEFET/RJ - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Diretor-geral: Carlos Henrique Figueiredo Alves

FAETEC - Fundação de Apoio à Escola Técnica

Presidente: Alexandre Sérgio Alves Vieira

IFF - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

Reitor: Jefferson Manhães de Azevedo

UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Reitor: Luis César Passoni

UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Reitor: Ruy Garcia Marques

UFF - Universidade Federal Fluminense

Reitor: Antonio Claudio Lucas da Nóbrega

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

Reitor: Roberto Leher

UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Reitor: Ricardo Luiz Louro Berbara

UNIRIO - Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

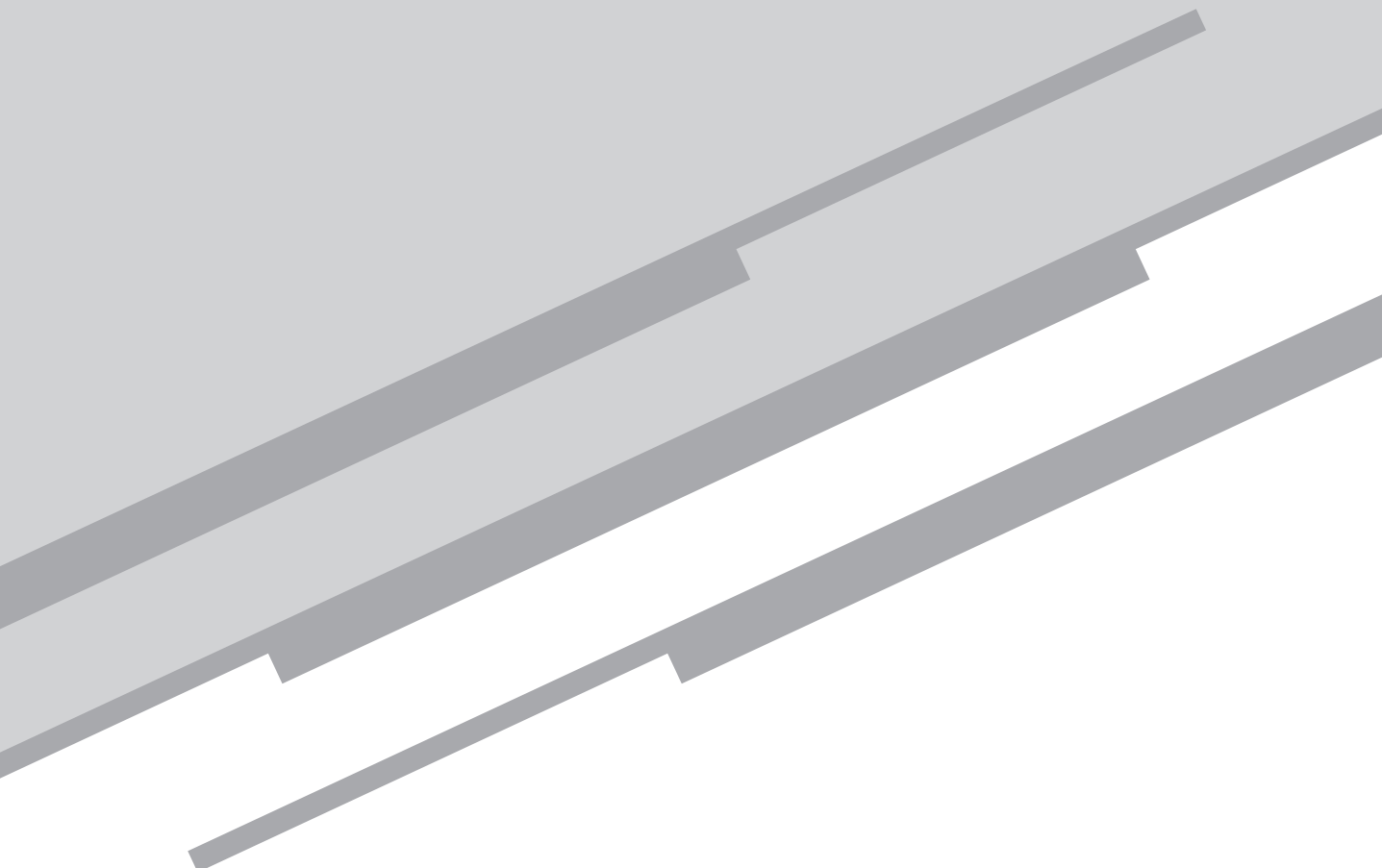
Reitor: Luiz Pedro San Gil Jutuca

Sumário

Aula 1 • Organização atômica: a estrutura cristalina.....	7
<i>Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila</i>	
Aula 2 • Imperfeições cristalinas	41
<i>Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila</i>	
Aula 3 • Propriedades mecânicas dos materiais	75
<i>Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila</i>	
Aula 4 • Diagramas de fase	109
<i>Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila</i>	
Aula 5 • O sistema ferro-carbono	143
<i>Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila</i>	
Aula 6 • Difusão atômica	173
<i>Valéria Vasconcellos de Ávila</i>	
Aula 7 • Mecanismos de deformação plástica e de endurecimento.....	197
<i>Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila</i>	
Aula 8 • Transformação de fase em metais	219
<i>Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila</i>	
Aula 9 • Fratura, Fadiga, Fluência.....	247
<i>Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila</i>	

Aula 1

Organização atômica: a estrutura cristalina



Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila

Meta

Apresentar as maneiras como os átomos se organizam para formar os materiais sólidos.

Objetivos

Esperamos que, após o estudo do conteúdo desta aula, você seja capaz de:

1. Diferenciar um material cristalino de um amorfo;
2. Identificar os conceitos que definem uma estrutura cristalina;
3. Identificar as principais estruturas cristalinas dos metais;
4. Identificar direções e planos cristalográficos;
5. Calcular densidades planares e lineares.

Pré-requisitos

Antes de você iniciar o estudo desta aula, faça uma revisão sobre estrutura atômica e ligações químicas. Isso facilitará a compreensão do conteúdo desta e das próximas aulas.

Você pode fazer revisão em livros de química do 2º grau. Uma sugestão de bibliografia para esse estudo seria:

Fundamentos de Química – Ricardo Feltre – Volume único – Editora Moderna

Introdução

Por que estudar estrutura cristalina?

As propriedades dos materiais estão diretamente associadas à sua estrutura cristalina, ou seja, da maneira pela qual os átomos, moléculas ou íons estão espacialmente dispostos. Por exemplo, Cromo e Tungstênio possuem a mesma estrutura cristalina e se deformam menos que o Ouro e o Alumínio, que possuem outra estrutura cristalina. O material possuir ou não uma determinada organização atômica (estrutura cristalina) pode explicar por que alguns materiais são opticamente transparentes e outros não.

Há um grande número de estruturas cristalinas, desde estruturas simples exibidas pelos metais até estruturas mais complexas exibidas por cerâmicos e polímeros.

Vamos começar?

Classificação geral dos materiais

Independente da classe na qual o material se classifica, existe uma correlação comum a qualquer tipo de material. As propriedades desse material estão diretamente ligadas à composição química, à **síntese** e **processamento** utilizados para obtenção desse material e à **microestrutura** gerada.

Os materiais são divididos em três classes distintas: metais, cerâmicos e polímeros:

- Metais

Os materiais metálicos são uma combinação de elementos metálicos. Esses materiais apresentam ligação química do tipo metálica e por esse motivo apresentam uma grande quantidade de elétrons livres e algumas de suas propriedades estão diretamente relacionadas a esse fato. Apresentam boa resistência mecânica, são bons condutores elétricos e térmicos e são opacos.

- Cerâmicos

Os materiais cerâmicos são formados por ligações iônico-covalentes entre metais e os elementos carbono, nitrogênio, oxigênio, fósforo e enxofre.

Possuem propriedades como:

Síntese

É o processo pelo qual os materiais são obtidos a partir dos produtos extraídos diretamente da natureza ou obtidos de um processamento anterior.

Processamento

Abrange as diferentes maneiras utilizadas para moldar materiais para transformá-los em componentes úteis ou mesmo para alterar as propriedades.

Microestrutura

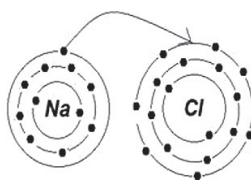
É a descrição dos arranjos de átomos ou íons em um material.

- alto ponto de fusão e estabilidade térmica, que é uma propriedade dos sistemas em resistir a variações de temperatura, sem mudanças da sua estrutura.
- são isolantes térmicos e por isso são utilizados como refratários. Por exemplo, os fornos são revestidos internamente com material refratário para manter a temperatura interna e evitar que o calor seja transferido para o meio externo.
- são isolantes elétricos,
- são frágeis, pois rompem sem deformar e podem ser transparentes.

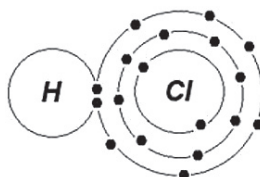
Alguns exemplos de materiais cerâmicos são: cerâmicas tradicionais (tijolos, telhas), vidros, cimento.



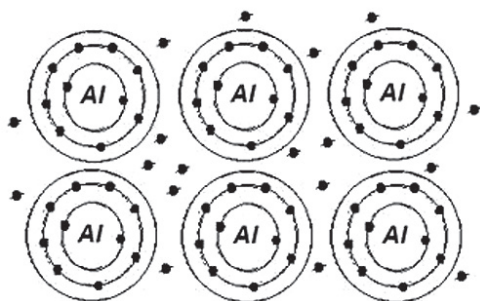
Ligação iônica: atração entre dois átomos com a função de se estabilizarem. Isso ocorre quando eles compõem 8 elétrons na última camada (camada de valência). Para formar uma ligação iônica, um ânion (íon de carga elétrica negativa) e um cátion (íon de carga elétrica positiva) se unem por meio da atração eletrostática que existe entre eles. Observe abaixo a representação gráfica da ligação iônica. Nela, há doação de elétrons.



Ligação covalente: compartilhamento de um ou mais pares de elétrons para compor 8 elétrons na última camada e se estabilizarem. Observe abaixo a representação gráfica da ligação covalente. Veja que nela há compartilhamento de elétrons.



Ligação metálica: ocorre a liberação dos elétrons da camada mais externa (por estarem mais distantes do núcleo do átomo). Os átomos se aglomeram e ficam imersos em uma nuvem de elétrons livres, formando as ligações metálicas, as quais mantêm os átomos unidos por meio da estrutura cristalina. Observe abaixo a representação gráfica da ligação metálica. Nela, os elétrons da última camada formam uma nuvem ao redor dos átomos.



- Polímeros

Os polímeros são formados por: carbono, hidrogênio, oxigênio, além de nitrogênio, enxofre e cloro. Caracterizam-se por ter baixa densidade, facilidade de conformação, e são geralmente pouco resistentes a altas temperaturas.

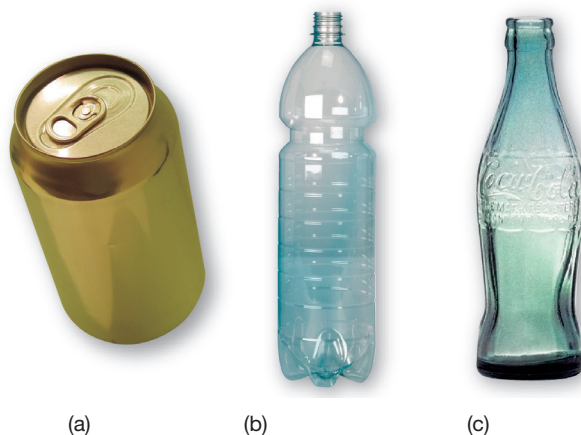


Figura 1.1: Embalagens de refrigerante: a) alumínio (metal); b) PET (polímero); c) vidro (cerâmica)

Célula unitária

Os materiais sólidos podem ser classificados de acordo com a regularidade na qual os átomos ou íons se dispõem em relação aos seus vizinhos. Material cristalino é aquele no qual os átomos encontram-se ordenados sobre longas distâncias atômicas, formando uma estrutura tridimensional que se chama rede cristalina. Já nos materiais não cristalinos ou amorfos não existe ordenação de longo alcance na disposição dos átomos.

Para estudar a ordenação atômica nos sólidos cristalinos, é preciso compreender o conceito de célula unitária.

A célula unitária consiste em um pequeno grupo de átomos que formam um modelo repetitivo, com uma forma geométrica conhecida, ao longo de uma estrutura tridimensional.

Observe a **Figura 1.2(a)**: Nela, podemos observar uma célula formada por oito átomos dispostos de maneira a formar uma geometria cúbica. Os átomos são representados como esferas rígidas.

Na **Figura 1.2 (b)**, podemos observar a repetição da célula cúbica formando o material em três dimensões. Alguns materiais metálicos (aço, latão) são formados pela repetição de células unitárias cúbicas.

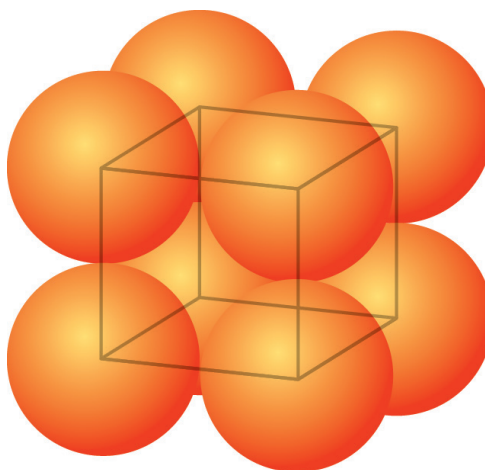


Figura 1.2: Representação de uma célula unitária cúbica

Sistemas cristalográficos (Rede de Bravais)

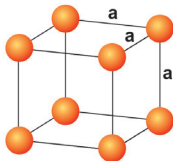
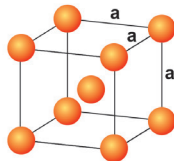
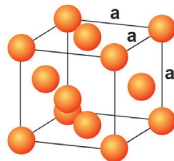
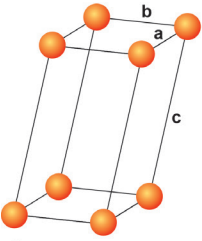
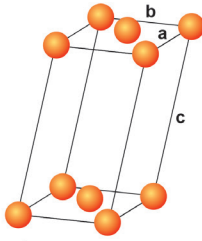
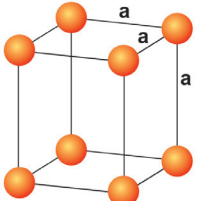
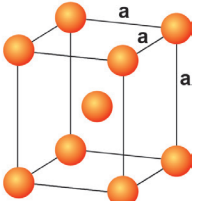
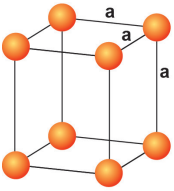
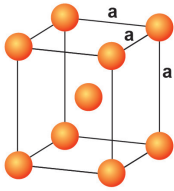
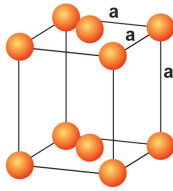
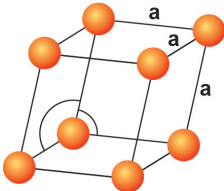
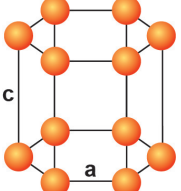
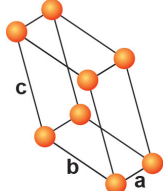
Podemos estudar os materiais a partir de sete sistemas cristalinos básicos. Eles estão descritos na Tabela a seguir:

Tabela 1.1: Sistemas cristalinos

Sistemas	Eixos	Ângulos entre eixos
Cúbico	$a = b = c$	Ângulos = 90°
Tetragonal	$a = b \neq c$	Ângulos = 90°
Ortorrômico	$a \neq b \neq c$	Ângulos = 90°
Monoclínico	$a \neq b \neq c$	2 ângulos = 90° / 1 ângulo $\neq 90^\circ$
Triclínico	$a \neq b \neq c$	Ângulos $\neq 90^\circ$
Hexagonal	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c$	3 ângulos = 90° / 1 ângulo = 120°
Romboédrico	$a = b = c$	Todos os ângulos iguais, mas diferentes de 90°

Partindo desses sistemas cristalinos, temos 14 possíveis modelos de células unitárias que descrevem qualquer estrutura cristalina conhecida. As células unitárias dentro de um mesmo sistema cristalino se diferenciam pelas posições ocupadas pelos átomos. Em todas as células unitárias, os átomos ocupam as posições dos vértices. A diferença é se haverá átomos no centro da célula ou nos centros das faces da célula. Observe a **Tabela 1.2**.

Tabela 1.2: Células unitárias

Cúbico		
		
Átomos apenas nos vértices	Átomos nos vértices e 1 no centro da célula	Átomos nos vértices e 1 no centro de cada face
Monoclínico		
		
Átomos apenas nos vértices	Átomos nos vértices e 1 no centro das faces superior e inferior	
Tetragonal		
		
Átomos apenas nos vértices	Átomos nos vértices e 1 no centro da célula	
Ortorrômbico		
		
Átomos apenas nos vértices	Átomos nos vértices e 1 no centro da célula	Átomos nos vértices e 1 no centro de cada face superior e inferior
Romboédrico	Hexagonal	Triclínico
		
Átomos apenas nos vértices	Átomos apenas nos vértices	Átomos apenas nos vértices



Observe a **Tabela 1.2**. Cada célula unitária é definida por dois parâmetros: o tamanho das arestas, que chamaremos de parâmetro de rede, e os ângulos entre as arestas. Por exemplo, uma célula cúbica se diferencia de uma célula tetragonal pela variação do tamanho de uma das arestas.

Atividade 1

Atende ao objetivo 1

Qual a diferença entre material cristalino e amorfo? Por que é importante considerar a estrutura ao projetar materiais de engenharia?

Resposta comentada

Um material cristalino é aquele que possui um arranjo ordenado dos átomos. Já um material amorfo não possui essa ordenação atômica, ou seja, os átomos estão dispostos de forma aleatória dentro do material. Todos os metais e todos os cerâmicos com exceção dos vidros possuem estrutura cristalina definida. Já os polímeros possuem estruturas cristalinas e amorfas. A estrutura está diretamente relacionada às propriedades dos materiais.

Conceitos para caracterização dos reticulados cristalinos

Os reticulados cristalinos se diferem pela sua geometria e também pela disposição dos átomos. Isso interfere em fatores importantes e que caracterizam cada reticulado. Então, vamos conceituá-los. No item 3, vamos detalhar as principais estruturas, e esses conceitos serão fundamentais.

Fator de empacotamento atômico - FEA

O fator de empacotamento atômico, FEA, é um parâmetro que mede o quanto da célula unitária é ocupada por átomos e o quanto é espaço vazio. Então, FEA é uma relação entre o volume atômico e o volume da célula unitária.

Vamos considerar o átomo como uma esfera rígida de raio R . Então, temos as seguintes relações:

- Volume dos átomos (V_a) = número de átomos da célula unitária (n) x volume da esfera $\left(\frac{4\pi R^3}{3} \right)$
- Volume da célula (V_c) – depende da geometria da célula

$$FEA = \frac{V_a}{V_c}$$



O volume da célula unitária será igual ao volume de um cubo para sistemas cúbicos. Para outros sistemas, é preciso considerar o respectivo volume. O desenvolvimento do fator de empacotamento para cada sistema será detalhado da seção 3.

Número de coordenação

O número de coordenação representa a quantidade de vizinhos mais próximo que um átomo possui dentro da estrutura cristalina. Neste caso, podemos considerar os átomos das células vizinhas.

Observe a **Figura 1.3**. Nela, temos um sistema cúbico simples, onde um átomo (escuro) é rodeado por seis átomos (claros). Qualquer átomo que você escolha terá a mesma quantidade de vizinhos.

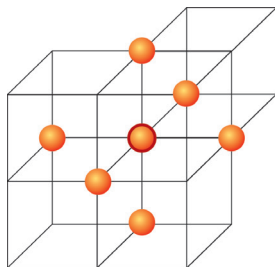


Figura 1.3: Representação do número de coordenação de um sistema cúbico simples.

Parâmetro de rede

São grandezas utilizadas para descrever a célula unitária de uma estrutura cristalina. Compreendem os três comprimentos (altura, espessura e largura) e os três ângulos respectivos. O volume da célula unitária e, conseqüentemente, as suas dimensões dependem do volume do átomo que forma essa célula. Vamos representar o átomo pelo seu raio R .

Mais adiante, vamos descrever essa relação para cada estrutura cristalina, mas observe a **Figura 1.4**; ela representa o parâmetro de rede mais simples, de um sistema cúbico simples, onde $a = 2R$.

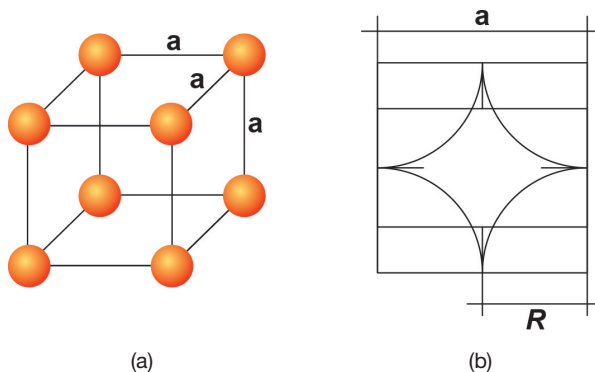


Figura 1.4: Representação do parâmetro de um sistema cúbico simples. (a) estrutura em 3D e (b) representação das faces do cubo.

Atividade 2

Atende ao objetivo 2

Supondo que uma substância se cristalice com o reticulado cúbico simples (CS), determine o número de coordenação e calcule o fator de empacotamento.

Resposta comentada

Para determinar o número de coordenação, veja a **Figura 1.3**. O número de coordenação é a quantidade de vizinhos mais próximos. Então, se você observar o átomo em destaque, verá que existem 6 átomos mais próximos. E qualquer átomo que você escolher terá 6 átomos vizinhos.

Para calcular o fator de empacotamento, é necessária a seguinte fórmula:

$$FEA = \frac{V_a}{V_c} = \frac{n \frac{4\pi R^3}{3}}{a^3}$$

Neste caso, $a = 2R$ e $n = 1$.

Então,

$$FEA = \frac{n \frac{4\pi R^3}{3}}{(2R)^3} = \frac{4\pi}{8 \cdot 3} = 0,52$$

Esse fator de empacotamento é baixo e, por isso, os metais não se cristalizam sob essa estrutura, conforme veremos na próxima seção.

Estrutura cristalina dos metais

Neste item, demonstraremos em detalhes as estruturas preferenciais dos elementos metálicos ao se solidificarem:

- a estrutura cúbica de corpo centrada (CCC)
- a estrutura cúbica de face centrada (CFC)
- a hexagonal compacta (HC)

Essa preferência se dá pelo fato de essas estruturas serem compactas, ou seja, possuírem valores elevados do fator de empacotamento atômico (FEA).

Quanto mais compacto é o sistema, isso significa que os átomos estão mais próximos uns dos outros, diminuindo assim a energia necessária para manter as ligações químicas; correspondem aos arranjos de mais baixa energia.

Estrutura cúbica de corpo centrada – CCC

Na estrutura cúbica de corpo centrada, conhecida como estrutura CCC, a célula unitária é representada por um cubo imaginário onde se tem um átomo em cada vértice e um átomo no centro do cubo. A **Figura 1.5** mostra a representação desta estrutura.

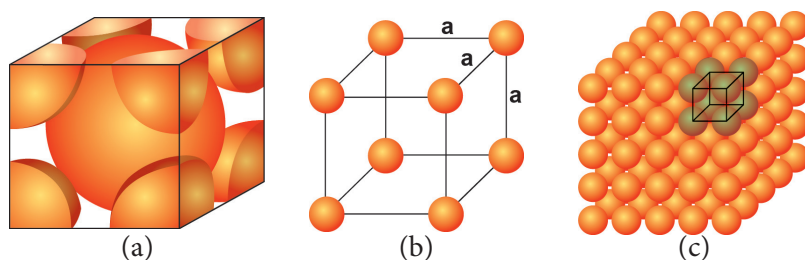


Figura 1.5: Representação esquemática de uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrada. (a) representação de esferas rígidas, (b) posições atômicas, (c) representação de várias células unitárias.

Observe a **Figura 1.6**. Na estrutura CCC, o átomo de cada um dos vértices do cubo é dividido com oito células unitárias vizinhas e, portanto, apenas $1/8$ do átomo faz parte de uma célula unitária. Já o átomo do centro pertence a uma única célula unitária, como detalhado na **Figura 1.5(a)**. Portanto, cada célula unitária tem um total de 2 átomos, sendo 8 (vértices) \times $1/8$ (átomos de cada vértice) + 1 (átomo do centro).

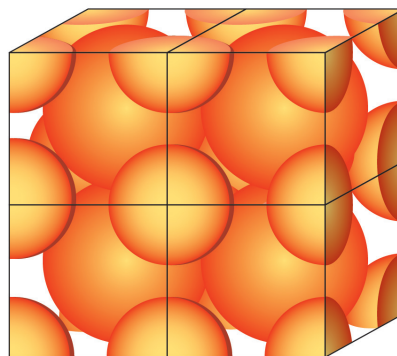


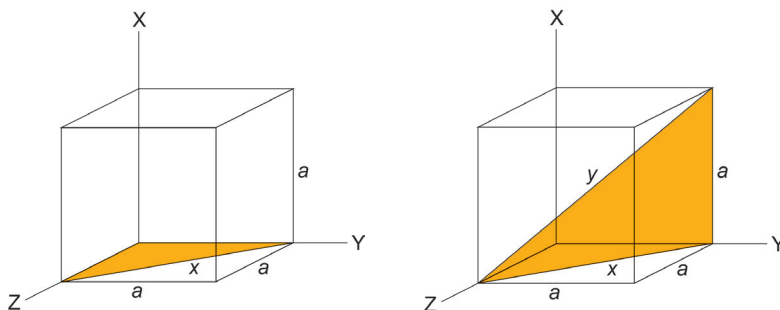
Figura 1.6: Representação da divisão dos átomos entre as células unitárias CCC. Observa-se que cada átomo do vértice ocupa 8 células unitárias.

O número de coordenação, que representa o número de vizinhos mais próximos, é igual a 8. Isso pode ser facilmente visualizado, através da **Figura 1.5(b)**, tomando por base o átomo do centro.

A relação entre o parâmetro de rede a (aresta do cubo) e o raio atômico R é importante porque o tamanho da célula unitária depende diretamente do átomo do qual a célula é formada. Vamos tomar por base a diagonal de um cubo que é igual a $a\sqrt{3}$, onde a representa a aresta do cubo.



A diagonal do cubo é uma relação trigonométrica. Pode ser desenvolvida a partir do teorema de Pitágoras. Observe o triângulo formado na base do cubo.



Aplicando Pitágoras, temos:

$$x^2 = a^2 + a^2$$

$$x^2 = 2a^2$$

$$x = a\sqrt{2}$$

Aplicando Pitágoras no triângulo formado pela diagonal do cubo, temos:

$$y^2 = x^2 + a^2$$

$$y^2 = 2a^2 + a^2$$

$$y = 3a^2$$

$$y = a\sqrt{3}$$

Observando a estrutura CCC, conforme a **Figura 1.7**, temos a representação de quatro raios atômicos ao longo da diagonal do cubo. Então,

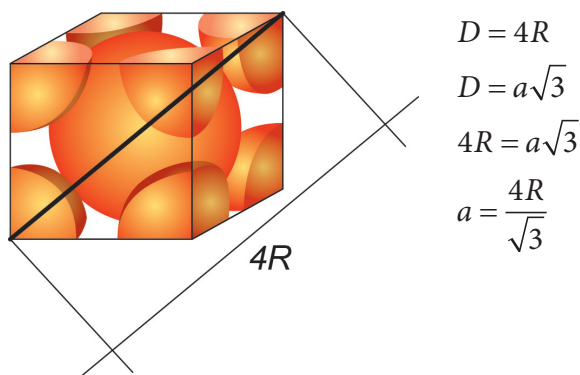


Figura 1.7: Representação da diagonal da estrutura CCC

O fator de empacotamento, como já explicado no item anterior, é a relação entre o volume dos átomos e o volume da célula unitária.

Na estrutura CCC, vimos que temos 2 átomos por célula unitária. O volume da célula unitária é a^3 e, como $a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$, tem-se $V_c = \left(\frac{4R}{\sqrt{3}}\right)^3$.

Então, temos a seguinte relação para o fator de empacotamento atômico para a estrutura CCC:

$$FEA = \frac{nV_a}{V_c} = \frac{2 \frac{4\pi R^3}{3}}{\left(\frac{4R}{\sqrt{3}}\right)^3}$$

$$FEA = \frac{8\pi R^3 \sqrt{3}}{64R^3}$$

$$FEA = \frac{\pi \sqrt{3}}{8} = 0,68$$

Esse resultado mostra que 68% do volume da célula unitária é ocupada por átomos e os 32% restantes são espaços vazios conhecidos como interstícios. Os átomos de alguns metais, como ferro, cromo e tungstênio, ao se solidificarem, arranjam-se sob a forma CCC.

Estrutura cúbica de face centrada – CFC

Na estrutura cúbica de face centrada, conhecida como estrutura CFC, a célula unitária é representada por um cubo imaginário onde se tem um átomo em cada vértice e um átomo no centro de cada face. A **Figura 1.8** mostra a representação desta estrutura.

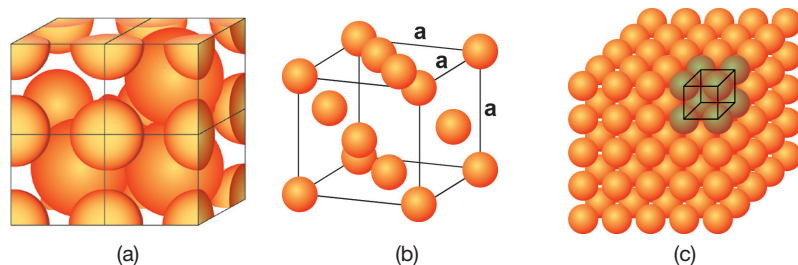


Figura 1.8: Representação esquemática de uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrada. (a) representação de esferas rígidas, (b) posições atômicas, (c) representação de várias células unitárias.

Na estrutura CFC, o átomo de cada um dos vértices do cubo é dividido com oito células unitárias vizinhas e, portanto, apenas 1/8 do átomo faz parte de uma célula unitária. Já o átomo do centro de cada face pertence a duas células unitárias, como detalhado na **Figura 1.7(a)**. Portanto, cada célula unitária tem um total de 4 átomos, sendo 8 (vértices) x 1/8 (átomos de cada vértice) + 6(faces) x 1/2 (átomo do centro de cada face). Observe a **Figura 1.9**.

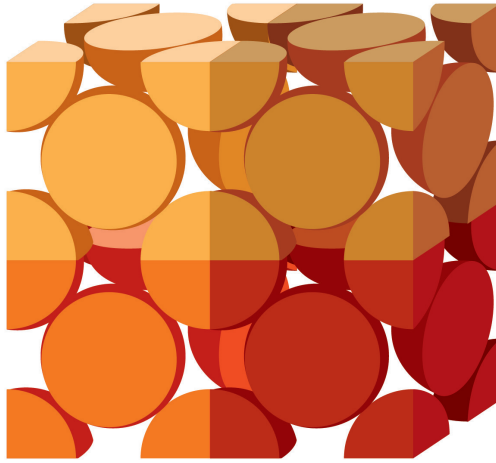


Figura 1.9: Representação da divisão dos átomos entre as células unitárias CFC. Observa-se que cada átomo do vértice ocupa 8 células unitárias e que os dos centros das faces pertencem a 2 células.

O número de coordenação, que representa o número de vizinhos mais próximos, é igual a 12. Isso pode ser visualizado através da **Figura 1.8(b)**, tomando por base o átomo do centro da face.

Para demonstrar a relação entre o parâmetro de rede e o raio, vamos tomar por base a diagonal da face do cubo, que é igual a $a\sqrt{2}$, onde a representa a aresta (parâmetro de rede) do cubo.

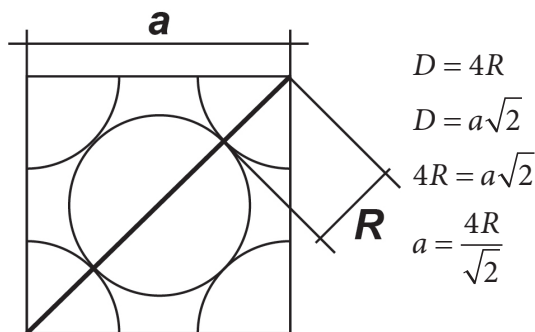


Figura 1.10: Representação da diagonal da face da estrutura CFC

Demonstraremos agora o fator de empacotamento para a célula CFC. Acabamos de definir que uma célula CFC tem 4 átomos por célula unitária. Ou seja, $n=4$.

Isso se dá pelo cálculo $[(1/8) \times 8 + 6 \times (1/2)] = 4$

O volume da célula unitária é a^3 e, como $a = \frac{4R}{\sqrt{2}}$, tem-se

$$V_c = \left(\frac{4R}{\sqrt{2}} \right)^3.$$

Então, temos:

$$FEA = \frac{nV_a}{V_c} = \frac{4 \frac{4\pi R^3}{3}}{\left(\frac{4R}{\sqrt{2}} \right)^3}$$

$$FEA = \frac{32\pi R^3 \sqrt{2}}{192R^3}$$

$$FEA = \frac{\pi \sqrt{2}}{6} = 0,74$$

Esse resultado mostra que 74% do volume da célula unitária é ocupada por átomos e os 26% restantes são espaços vazios conhecidos como interstícios. Os átomos de alguns metais, como ferro, alumínio e prata, ao se solidificarem, se arranjam sob a forma CFC.

Estrutura hexagonal compacta – HC

Os metais não se cristalizam sob a forma da estrutura hexagonal simples devido ao baixo empacotamento atômico. Alguns se cristalizam na estrutura hexagonal compacta, conhecida como estrutura HC; a célula unitária é representada na **Figura 1.11**.

O fator de empacotamento atômico da estrutura HC é 0,74, igual ao da estrutura CFC, já que as duas são as estruturas mais compactas. O número de coordenação dessa estrutura também é igual ao do CFC, 12. Isso significa que cada átomo está rodeado de 12 átomos vizinhos.

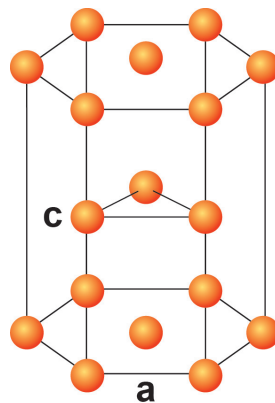


Figura 1.11: Representação esquemática da estrutura hexagonal compacta –HC

Na estrutura HC, o átomo de cada um dos vértices do hexágono é dividido com seis células unitárias vizinhas e, portanto, apenas 1/6 do átomo faz parte de uma célula unitária. Observe **Figura 1.12**.

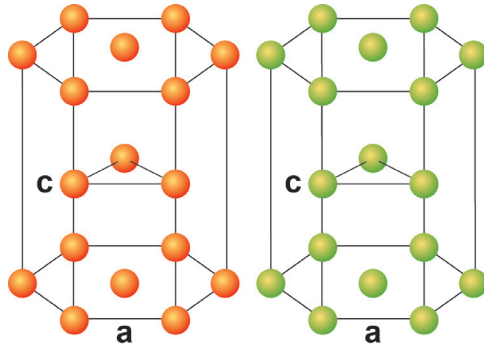


Figura 1.12: Representação da divisão dos átomos entre as células unitárias HC. Observa-se que cada átomo do vértice ocupa 6 células unitárias e que os dos centros das faces superior e inferior pertencem a 2 células. Os 3 átomos centrais pertencem a uma única célula unitária.

Já os átomos que se localizam na face superior e inferior pertencem a duas células, e os três átomos do plano intermediário pertencem a uma única célula. Portanto, cada célula unitária tem um total de 6 átomos, sendo 12 (vértices) \times $1/6$ (átomos de cada vértice) $+ 2$ (faces: superior e inferior) \times $1/2$ (átomo do centro de cada face) $+ 3$ (átomo do centro).

Nessa estrutura, temos dois parâmetros de rede, como pode ser visto na **Figura 1.9(a)**: a é a medida da aresta da base e c é a altura do prisma hexagonal. Em uma estrutura ideal, a razão c/a é igual a 1,633. Então, temos as seguintes relações de parâmetros de rede:

$$a = 2R$$

$$\frac{c}{a} = 1,633$$

Para calcular o FEA para a estrutura HC, é preciso considerar o volume do prisma hexagonal, que é igual a $19,59R^3\sqrt{3}$.

$$FEA = \frac{nV_e}{V_c}$$

$$FEA = \frac{6 \frac{4}{3} \pi R^3}{19,59R^3\sqrt{3}}$$

$$FEA = 0,74$$

Atividade 3

Atende ao objetivo 3

Quando o ferro apresenta uma estrutura cristalina CCC, quantos átomos existem por célula unitária?

Resposta comentada

Na estrutura CCC, o átomo de cada um dos vértices do cubo é dividido com oito células unitárias vizinhas e, portanto, apenas $1/8$ do átomo faz parte de uma célula unitária. Já o átomo do centro pertence a uma única célula unitária, como detalhado na **Figura 1.5(a)**. Portanto, cada célula unitária tem um total de 2 átomos, sendo 8 (vértices) \times $1/8$ (átomos de cada vértice) + 1 (átomo do centro).

Direções e planos cristalográficos

É importante estudar as direções e planos cristalográficos porque isso será útil posteriormente, quando tivermos estudando mecanismos de deformação plástica. Quando um material metálico se deforma plasticamente, os átomos se movimentam e esse movimento acontece em direções e planos (sistema) preferenciais, e cada estrutura cristalina possui um conjunto de sistemas para movimentação atômica. Isso explica, por exemplo, por que alguns metais são mais resistentes que outros. Esse assunto será detalhado em aulas futuras.

Direções cristalográficas

Para estudarmos as direções cristalográficas, vamos definir um sistema de coordenadas em 3D. Qualquer linha (ou direção) dentro de uma célula unitária pode ser especificada através de dois pontos: um deles é sempre tomado como sendo a origem do sistema de coordenadas, geralmente $(0,0,0)$.

As direções, dentro do sistema cúbico, possuem uma representação gráfica, onde as três coordenadas são escritas dentro de chaves e não são separadas por vírgulas: $[u\ v\ w]$. São designadas por índices de Miller.

Considere o exemplo da **Figura 1.10**. Temos um cubo e uma direção qualquer com duas posições bem definidas. Para determinar a direção, basta diminuir a posição final da inicial.

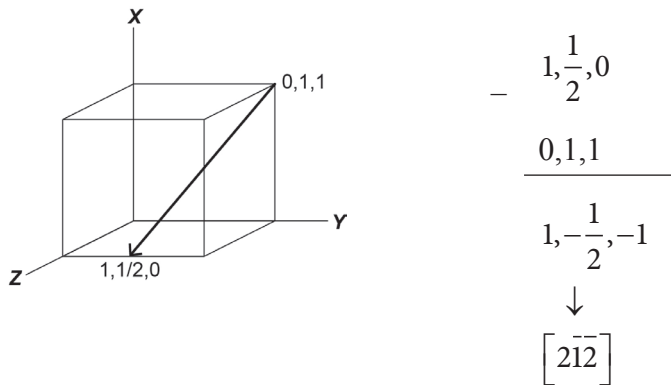


Figura 1.10: Representação de uma direção

Observe que só representamos uma direção com números inteiros, e o negativo é re+presentado por um traço acima. Por isso, neste caso, multiplicamos por dois todos os números obtidos como resultado da subtração anterior.

A **Figura 1.13** mostra algumas outras direções. Observe:

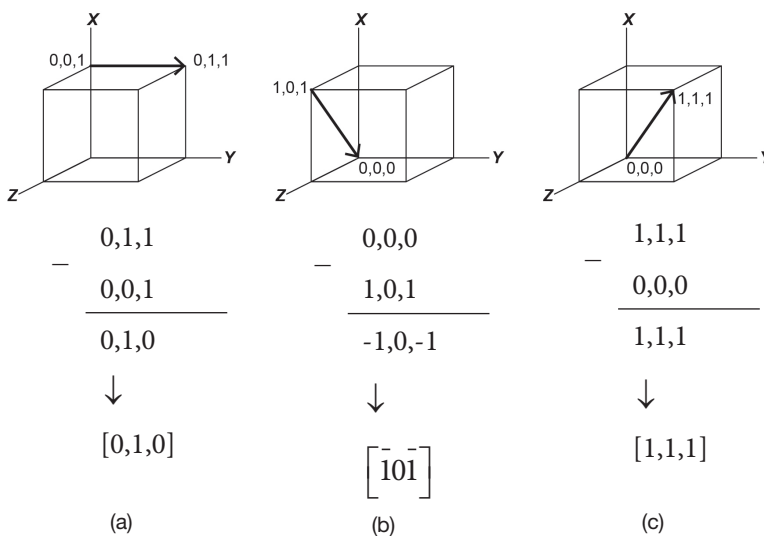


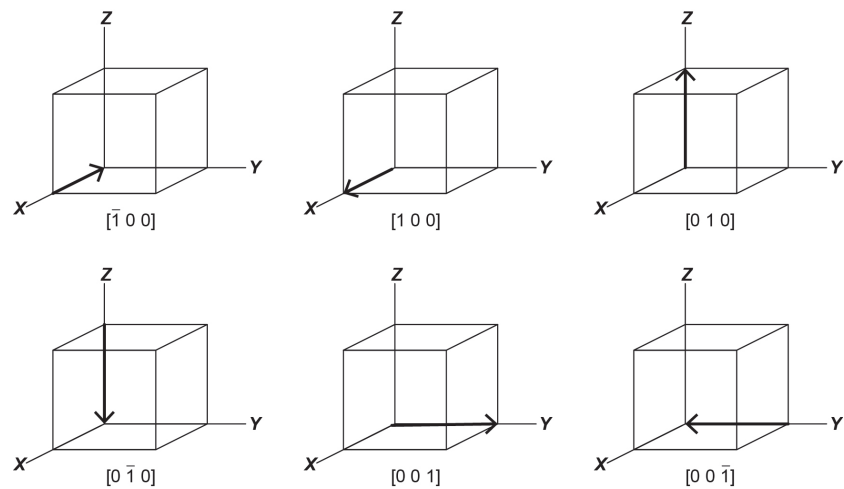
Figura 1.13: Representações e índices de Miller das direções: a) arestas; b) diagonal da face; c) diagonal do cubo

Na **Figura 1.11(a)**, temos uma direção que coincide com a aresta do cubo. Em **1.11(b)**, temos a direção que representa a diagonal da face do cubo. E em **1.11(c)**, temos a direção da diagonal do cubo.

A simetria do sistema cúbico permite que as direções equivalentes sejam agrupadas para formar uma família de direções. A família de direções é representada por $\langle uvw \rangle$. Então,

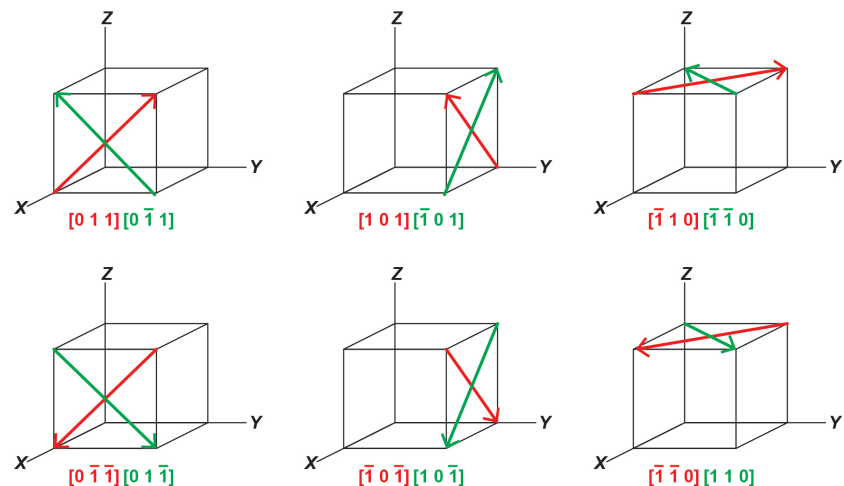
- A família $\langle 10\ 0 \rangle$ representa as arestas do cubo. Veja a **Tabela 1.3**:

Tabela 1.3: Família de direções $\langle 10\ 0 \rangle$ e indicação dos índices de Miller correspondente.



A família $\langle 11\ 0 \rangle$ representa as diagonais das faces. Veja a **Tabela 1.4**.

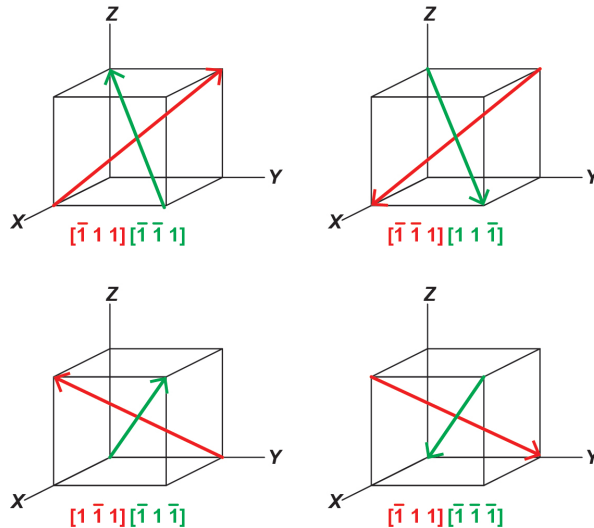
Tabela 1.4: Família de direções $\langle 11\ 0 \rangle$ e indicação dos índices de Miller correspondente.



Uma observação importante: a mesma direção em um plano paralelo possui o mesmo índice de Miller.

- A família $\langle 111 \rangle$ representa as diagonais do cubo. Veja **Tabela 1.5**.

Tabela 1.5: Família de direções $\langle 111 \rangle$ e indicação dos índices de Miller correspondente.

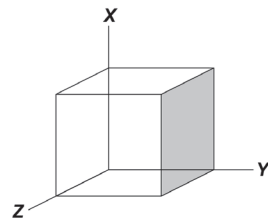


4.2. Planos cristalográficos

Para estudarmos os planos cristalográficos, vamos considerar também um sistema de coordenadas em 3D com origem (0,0,0).

Os planos, dentro do sistema cúbico, possuem uma representação gráfica, onde as três coordenadas são escritas entre parênteses e não são separadas por vírgulas: (h k l). São designadas por índices de Miller.

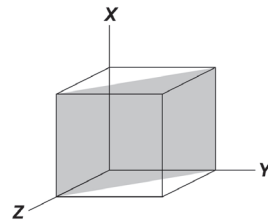
Vamos aprender a utilizar esse sistema de representação através do exemplo da **Figura 1.14**. Observe que, primeiramente, determinamos em que ponto o plano intercepta cada um dos três eixos. Posteriormente, obtém-se o inverso dos valores obtidos. O resultado indica o plano cristalográfico procurado.



- Intercepta $x = \infty$
- Intercepta $y = 1$
- Intercepta $z = \infty$

Fazendo o inverso dos três interceptos, temos:

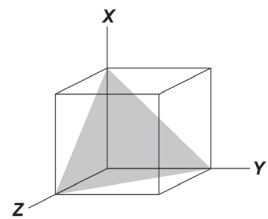
$$\frac{1}{\infty}, \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty} = (010)$$



- Intercepta $x = \infty$
- Intercepta $y = 1$
- Intercepta $z = 1$

Fazendo o inverso dos três interceptos, temos:

$$\frac{1}{\infty}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1} = (011)$$



- Intercepta $x = 1$
- Intercepta $y = 1$
- Intercepta $z = 1$

Fazendo o inverso dos três interceptos, temos:

$$\frac{1}{1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1} = (111)$$

Figura 1.14: Definição dos principais planos do sistema cúbico e seus respectivos índices de Miller

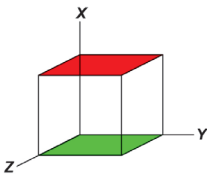
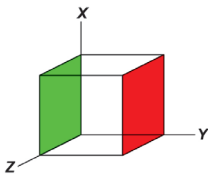
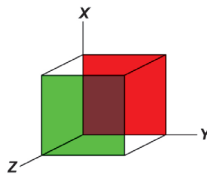
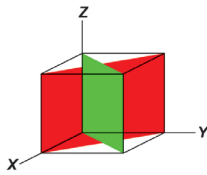
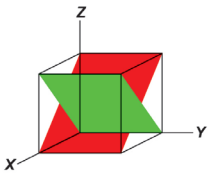
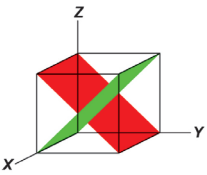
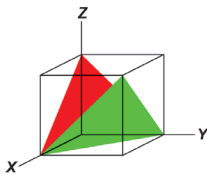
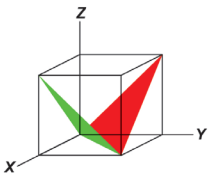
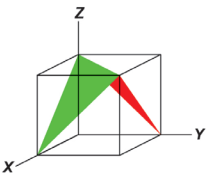
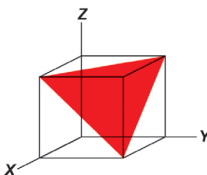
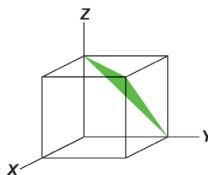
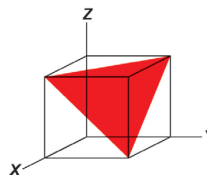
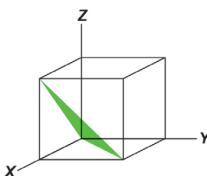

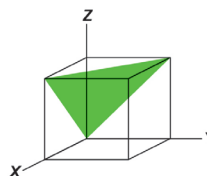
A simetria do sistema cúbico permite que os planos equivalentes sejam agrupados para formar uma família de planos.

A **Tabela 1.6** mostra as famílias de planos. A família de planos é representada por: $\{h \ k \ l\}$.

Então:

- A família $\{1 \ 0 \ 0\}$ representa as faces do cubo;
- A família $\{1 \ 1 \ 0\}$ representa os planos que cortam duas diagonais das faces;
- A família $\{1 \ 1 \ 1\}$ representa os planos que cortam três diagonais das faces.

Tabela 1.6: Representação das principais famílias de planos e seus respectivos índices de Miller.

Família { 1 0 0 }		
		
$(0\ 0\ 1)(0\ 0\ \bar{1})$	$(0\ 1\ 0)(0\ \bar{1}\ 0)$	$(\bar{1}\ 0\ 0)(1\ 0\ 0)$
Família { 1 1 0 }		
		
$(1\ 0\ 0)(1\ \bar{0}\ 0)$	$(1\ 0\ 1)(1\ \bar{0}\ 1)$	$(0\ 1\ 1)(0\ \bar{1}\ 1)$
Família { 1 1 1 }		
		
		
		

Mais adiante, estudaremos como ocorre o processo de deformação plástica em metais. Para isso, é preciso conhecer os planos e direções cristalográficas. Mas, além disso, precisaremos de mais dois conceitos importantes: densidade planar e densidade linear.

$$\begin{array}{rcl}
 A & 1 & 1 & 1 \\
 - & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\
 \hline
 & \frac{1}{2} & 1 & 1 \\
 & [1 & 2 & 2]
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{rcl}
 B & 0 & 1 & 1 \\
 - & 1 & 1 & 0 \\
 \hline
 & -1 & 0 & 1 \\
 & [\bar{1}01]
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{rcl}
 C & 1 & 1 & 0 \\
 - & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 & 1 & 1 & -1 \\
 & [11\bar{1}]
 \end{array}$$

Para determinar os planos, vamos determinar os interceptos e fazer o inverso.

A

intercepta x = 1

Intercepta y = 1

Intercepta z = ∞

$$\frac{1}{1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty} = 1, 1, 0 \rightarrow (110)$$

B

intercepta x = 1

Intercepta y = -1

Intercepta z = ∞

$$\frac{1}{1}, -\frac{1}{1}, \frac{1}{\infty} = 1, -1, 0 \rightarrow (1\bar{1}0)$$

Densidade atômica linear

A densidade atômica linear ρ_L mede a compactação dos átomos em uma determinada direção, ou seja, é o fator de empacotamento em uma dada direção. É dada pela relação entre o número de raios atômicos que interceptam uma determinada direção pelo comprimento da direção.

$$\rho_L = \frac{\text{quantidade de raios inteiros} * \text{raio do átomo}}{\text{comprimento da direção}}$$

Exemplo 1.1: Calcular a densidade atômica linear na direção $[0\ 1\ 1]$ de uma rede CFC.

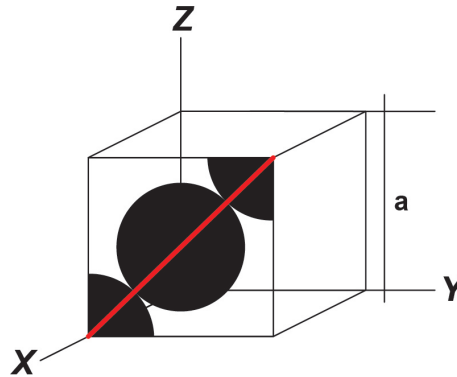


Figura 1.15: Representação da direção $[0\ 1\ 1]$ da estrutura cristalina CFC.

Observe a **Figura 1.15**. Nela, está representada a direção $[0\ 1\ 1]$ da estrutura CFC.

Podemos observar que, nessa direção, temos 4 raios que a interceptam. O parâmetro de rede (relação entre a aresta e o raio atômico) da estrutura CFC é $a = \frac{4R}{\sqrt{2}}$. A direção em questão é a diagonal da face (diagonal do quadrado), dada por $a\sqrt{2}$. Então, temos:

$$\rho_L = \frac{4R}{a\sqrt{2}}$$

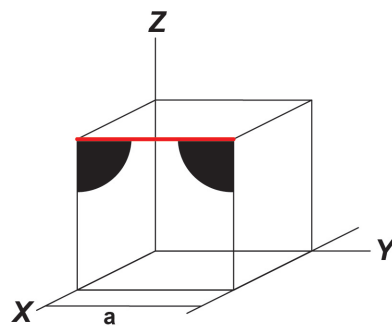
$$\text{Substituindo a por } \frac{4R}{\sqrt{2}}, \text{ temos: } \rho_L = \frac{4R}{4R} = 1$$

Esse resultado mostra que toda direção é ocupada por átomos. Podemos concluir também que todas as direções que pertencem à família $\langle 110 \rangle$ possuem a mesma densidade linear.

===== **Atividade 5** =====

Atende ao objetivo 5

Calcular a densidade atômica linear na direção $[0\ 1\ 0]$ de uma rede CFC.

Resposta comentada

Neste caso, a direção $[0\ 1\ 0]$ é a aresta mostrada em destaque na figura. Como podemos observar, ela é interceptada por 2 raios atômicos. A aresta (parâmetro de rede é igual a $\frac{4R}{\sqrt{2}}$).

$$\rho_L = \frac{2R}{a}$$

$$\rho_L = \frac{2R}{\frac{4R}{\sqrt{2}}} = \frac{2\sqrt{2}}{4} = 0,78$$

O resultado nos mostra um valor menor que 1. Isso porque parte da aresta está vazia, ou seja, os átomos não se encostam nessa direção.

Densidade atômica planar

A densidade atômica planar ρ_P mede a compactação dos átomos em um determinado plano, ou seja, é o fator de empacotamento em um dado plano. É dada pela relação entre o número de áreas circulares que interceptam um determinado plano pela área do plano.

$$\rho_P = \frac{\text{quantidade de áreas} \times \text{área do círculo}}{\text{área do plano}}$$

Exemplo 1.2: Calcular a densidade atômica planar do plano (1 0 0) de uma rede CCC.

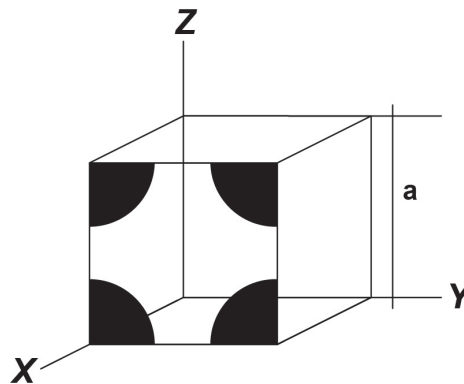


Figura 1.16: Representação do plano (1 0 0) da estrutura cristalina CCC

Observe a **Figura 1.16**. Nela, está representada a direção (1 0 0) da estrutura CCC. Podemos observar que nesse plano temos 1 área que a intercepta.

O parâmetro de rede (relação entre a aresta e o raio atômico) da estrutura CCC é $a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$.

Então, temos:

$$\rho_P = \frac{1 \times \pi R^2}{a^2}$$

$$\text{Substituindo } a \text{ por } \frac{4R}{\sqrt{3}}, \text{ temos: } \rho_P = \frac{\pi R^2}{\left(\frac{4R}{\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{3\pi}{16} = 0,58$$

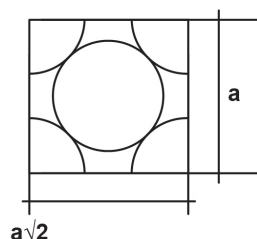
Esse resultado mostra que 58% do plano é ocupado por átomos. Podemos concluir também que todos os planos que pertencem à família {1 0 0} possuem a mesma densidade planar.

Atividade 6

Atende ao objetivo 5

Calcular a densidade atômica planar na direção (1 1 0) de uma rede CCC.

Resposta comentada



Neste caso, o plano (1 1 0) é o mostrado na figura. Verifique na Tabela 1.6. Como podemos observar, o plano é interceptado por 2 áreas. A aresta (parâmetro de rede) é igual a $\frac{4R}{\sqrt{3}}$.

$$\rho_P = \frac{2 * \pi R^2}{a * a \sqrt{2}}$$

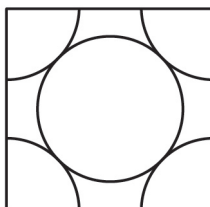
$$\rho_P = \frac{2\pi R^2}{\left(\frac{4R}{\sqrt{3}}\right)^2 \sqrt{2}} = \frac{2\pi R^2}{\frac{16R^2}{3} \sqrt{2}} = 0,84$$

O resultado nos mostra um valor menor que 1. Isso porque parte do plano está vazio. Mas repare: ele é mais compacto do que o plano (1 0 0) demonstrado no exemplo 1.2.

Atividade Final

Atende aos objetivos 2, 3 e 4

Considere o esboço abaixo, do plano (110) de uma rede cúbica.



- a) Identifique a estrutura cristalina ao qual este plano pertence.
- b) Se o esboço correspondesse a um plano (100), qual seria a estrutura?
- c) Calcule a relação entre o parâmetro de rede e o raio.

Resposta comentada

O plano (1 1 0) é o plano que corta a diagonal do cubo. Vide Tabela 1.6. A estrutura cristalina que possui um átomo no centro é a CCC.

O plano (1 0 0) é um plano da face. Vide Tabela 1.6. A estrutura que possui um átomo no centro da face é a CFC.

Calculado no item 3.1

O fator de empacotamento é a relação entre o volume dos átomos e o volume da célula unitária. Na estrutura CCC, vimos que temos 2 átomos por célula unitária. O volume da célula unitária é a^3 e, como $a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$, tem-se $V_c = \left(\frac{4R}{\sqrt{3}}\right)^3$.

Então, temos a seguinte relação para o fator de empacotamento atômico para a estrutura CCC:

$$FEA = \frac{nV_a}{V_c} = \frac{2 \frac{4\pi R^3}{3}}{\left(\frac{4R}{\sqrt{3}}\right)^3}$$

$$FEA = \frac{8\pi R^3 \sqrt{3}}{64R^3}$$

$$FEA = \frac{\pi \sqrt{3}}{8} = 0,68$$

Esse resultado mostra que 68% do volume da célula unitária é ocupada por átomos, e os 32% restantes são espaços vazios conhecidos como interstícios.

Conclusão

O estudo das estruturas cristalinas é de grande importância em Ciências dos Materiais. É o ponto de partida para conhecermos o comportamento dos materiais e como podemos modificar suas propriedades.

Então, saber se o material é cristalino ou amorfo e, se cristalino, sob qual estrutura cristalina se cristaliza, é fundamental para determinarmos suas propriedades. Uma propriedade importante para materiais de engenharia é a capacidade de se deformar plasticamente. Para isso, o conceito de densidade atômica linear e planar são fundamentais.

Resumo

Após o término desta aula, podemos concluir que:

- A forma como os átomos se organizam dentro da estrutura está diretamente relacionada às suas propriedades;
- Os materiais podem ser cristalinos, quando há uma organização dos átomos segundo um arranjo definido, ou amorfos, quando não há organização atômica;
- Os materiais podem se dividir em polímeros, cerâmicos e metais. Os metais possuem a estrutura cristalina mais simples, por apresentarem ligações metálicas;

- As células unitárias definem a forma de repetição dos átomos. Os metais se cristalizam sob as formas CCC, CFC e HC;
- Alguns parâmetros definem as células unitárias: número de coordenação, parâmetro de rede e fator de empacotamento atômico;
- Dentro das células unitárias, podemos definir planos e direções, e esses são denominados através dos seus índices de Miller;
- Os planos e direções possuem densidades atômicas designadas por densidade atômica linear e densidade atômica planar.

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, veremos que nos materiais reais as estruturas cristalinas apresentam imperfeições. Essas imperfeições são descontinuidades na ordenação atômica e são importantes para as propriedades dos materiais.

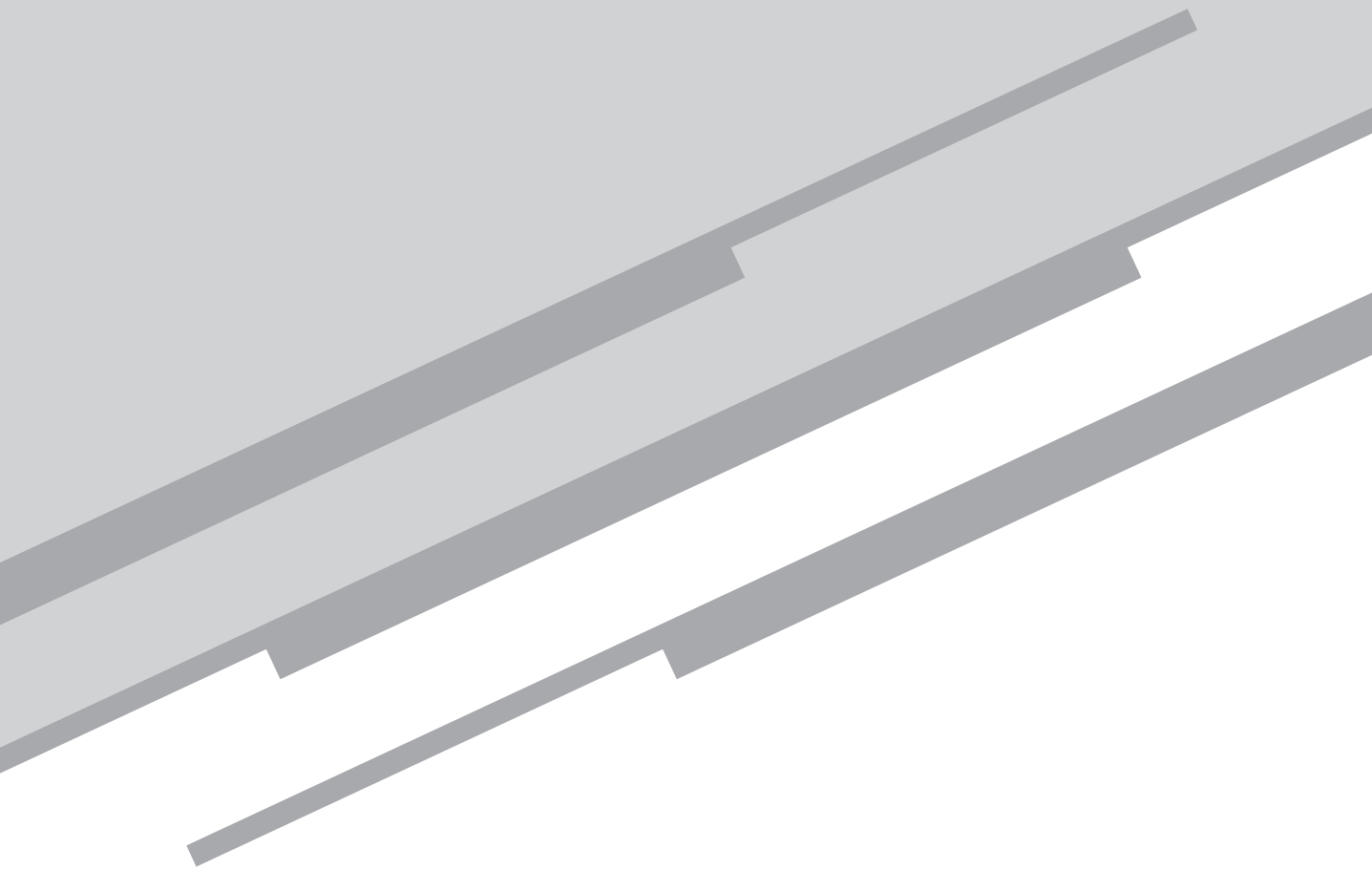
Até lá!

Referências

Ciência e Engenharia de materiais: uma introdução de Willian D. Callister Jr e David G. Rethwisch, 8ª edição - LTC Princípios de Ciência e tecnologia dos materiais. Laurence H. Van Vlack – Editora Campos.

Aula 2

Imperfeições cristalinas



Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila

Metas

Analisar a organização atômica e os tipos de imperfeições ou defeitos cristalinos, bem como as suas características. Apresentar a solução sólida como um defeito cristalino.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. identificar uma solução sólida como um defeito cristalino através de suas características;
2. identificar os tipos de defeitos cristalinos: defeitos pontuais, defeitos lineares, defeitos planares ou interfaciais e defeitos volumétricos;
3. diferenciar os tipos de defeitos cristalinos.

Pré-requisitos

Antes de iniciar o estudo desta aula, faça uma revisão da Aula 1. Só será possível entender as imperfeições que existem em uma estrutura cristalina se você conhecer bem a estrutura ideal!

Introdução

Na Aula 1, estudamos os conceitos de estrutura cristalina e, consequentemente, o de estruturas ideais. Mas os materiais reais apresentam vários tipos de defeitos e em grande número! Esses defeitos não são propriamente indesejáveis, pois muitas das propriedades dos materiais dependem desse desvio da idealidade de sua estrutura cristalina.

Como exemplo dessas propriedades, temos a ductilidade, que representa o grau de deformação que um material suporta até o momento de sua fratura. Veja: na natureza, temos que o ferro puro é um material extremamente dúctil, ou seja, ele possui um grau de deformação muito alto antes de se romper. O ferro, na temperatura ambiente, apresenta uma estrutura cristalina CCC, enquanto o aço é uma solução sólida de carbono em ferro. Isso significa que os átomos de carbono entram na estrutura cristalina do ferro e causam perturbações e um dos principais efeitos disso é o aumento da resistência do material. Ou seja, quanto maior o percentual de carbono no ferro, menos dúctil ele fica.

Dessa forma, percebemos que é através do domínio de características como a ductilidade, por exemplo, que podemos criar novos materiais, a partir da combinação desejada de propriedades e da introdução de defeitos de forma controlada.

Vamos a um exemplo de como podemos controlar a quantidade de defeitos. Fique tranquilo(a) que, ao longo do curso, veremos outros exemplos!

Os metais se encontram na natureza na forma de minérios. O ferro pode ser naturalmente encontrado em alguns minérios, sendo o principal deles a hematita (Fe_3O_4). Para obtermos o ferro através desse minério, ele deve passar por um processo conhecido por *redução*, ou seja, é preciso promover reações capazes de desfazer a ligação existente entre o ferro e o oxigênio.



Minério é um agregado de minerais rico em um determinado mineral ou elemento químico que é econômica e tecnologicamente viável para extração (mineração). Pode ser uma rocha, sedimento ou solo. O minério é constituído de minerais de minério (ou minerais de interesse econômico) e ganga (ou minerais que não possuem interesse econômico).

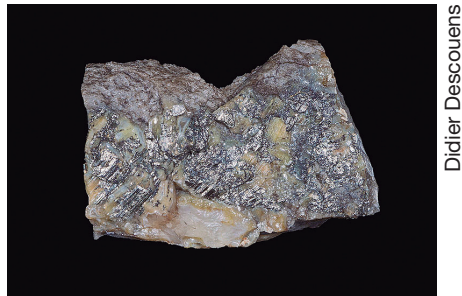


Figura 2.1: Calaverita, que é o minério de onde se extrai o ouro.

Fonte: <https://goo.gl/CZVhph>



Figura 2.2: Rutilo, que é de onde se retira o titânio.

Fonte: <https://goo.gl/ecHQTH>



Figura 2.3: Uraninita, de onde se extrai o urânio.

Fonte: <https://goo.gl/0HGBi0>

Os minerais dos quais são extraídos metais e outros produtos com vantagem econômica são chamados de minerais de minério. Os minerais de minério mais comuns ocorrem como óxidos, sulfetos, silicatos e haletos.

O processo de redução da hematita acontece em altas temperaturas, se na presença de uma fonte de carbono. Ao final desse processo, temos um produto no estado líquido conhecido como ferro-gusa, que possui, em média, 4,5% de carbono. O ferro-gusa é extremamente duro e, por isso, é difícil conformá-lo. Então, o produto passa por outro processo, conhecido por refino, etapa que serve para retirar o excesso de carbono, e, então, obtermos o aço.

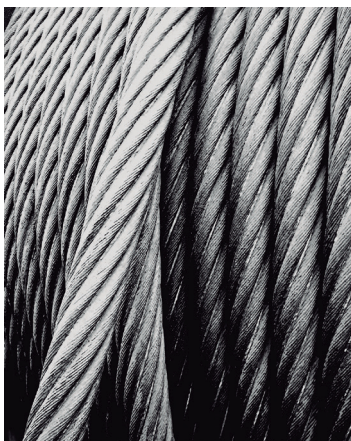
Entretanto, existem muitos tipos de aço. O que os difere é exatamente a quantidade de carbono que ficará dissolvida no ferro e isso é controlado no processo de refino. Então, quanto maior a quantidade de carbono remanescente no ferro, mais duro e resistente será o aço.



Eurico Zimbres FGEL/Uerj

Figura 2.4: Hematita originária de Minas Gerais.

Fonte: <https://goo.gl/a5hH4C>



Johannes 'volty' Hemmerlein

Figura 2.5: Cabos de aço da mina alemã de Zeche Zollern.

Fonte: <https://goo.gl/CvoOJZ>



Alchemist-hp

Figura 2.6: Ferro eletroliticamente refinado, com elevado grau de pureza.

Fonte: <https://goo.gl/3AUK5H>



ChristianSchd

Figura 2.7: Ferro-gusa.

Fonte: <https://goo.gl/n5oAs0>

Muito bem... Até aqui entendemos que os materiais reais apresentam vários tipos de defeitos, que esses defeitos são causados pela existência de impurezas na sua composição e que esses defeitos se relacionam com algumas propriedades que os materiais apresentam, como, por exemplo, novamente, a ductilidade. A seguir, temos mais alguns efeitos causados pela presença de imperfeições:

- a deformação mecânica dos materiais promove a formação de imperfeições que geram um aumento na resistência mecânica (processo conhecido como *encruamento*);
- o processo de dopagem em semicondutores visa criar imperfeições para mudar o tipo de condutividade em determinadas regiões do material.



Dopagem de semicondutores

A dopagem de semicondutores consiste em um procedimento de adição de impurezas químicas a um elemento semicondutor, com o objetivo de torná-lo mais condutor, a partir de um processo controlado.

Separamos um vídeo que mostra, de forma resumida, como esse processo ocorre: <https://www.youtube.com/watch?v=-ZBZ3qZ7hOM>.

Visto tudo isso, vamos estudar os tipos de defeitos cristalinos? Venha comigo!

Os defeitos cristalinos são imperfeições (erros) no arranjo periódico regular dos átomos de um cristal. Essas imperfeições acontecem por irregularidades na periodicidade dos átomos dentro do reticulado cristalino e/ ou pela adição de outros elementos dentro do cristal.

Os defeitos relacionados às irregularidades na posição dos átomos na estrutura cristalina são classificados em:

1. **pontuais:** associados às irregularidades nas posições atômicas;
2. **lineares:** associados às irregularidades em uma dimensão;
3. **planos ou interfaciais:** associados às irregularidades em duas dimensões;
4. **volumétricos:** associados às irregularidades em três dimensões.

Os *defeitos pontuais, lineares e planares* são *microscópicos*, enquanto que alguns *defeitos volumétricos* são *macroscópicos*, ou seja, podem ser vistos a olho nu.

Defeitos pontuais

São *defeitos associados a uma posição atômica*. Podem ocorrer de duas formas:

- *vacâncias, vazios ou lacunas:* podemos ter a falta de um átomo na posição regular;

- intersticiais: podemos ter átomos do próprio reticulado ou de outro átomo ocupando posições que normalmente estariam vazias.

Esses defeitos causam distorções na rede cristalina e influenciam nas propriedades dos materiais.

Vacâncias, vazios ou lacunas

Este defeito está relacionado com a falta de um átomo na sua posição dentro do reticulado cristalino (**Figura 2.8**). São formados durante a solidificação ou como resultado da *difusão atômica*.

A difusão atômica é a movimentação dos átomos dentro do reticulado como resultado das vibrações atômicas. A presença das vacâncias facilita o processo de difusão, que será tratado em detalhes na Aula 6.

A vacância se forma durante o processo de solidificação (o reticulado cristalino se forma na solidificação), pois, enquanto na forma líquida, os átomos não possuem arranjo cristalino. A difusão acontece mesmo sem vacâncias, mas a presença delas é um facilitador. E elas sempre existem!

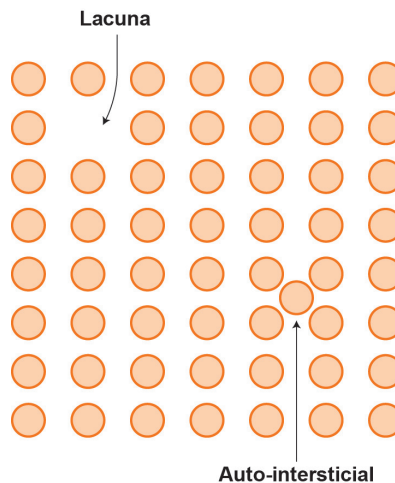


Figura 2.8: Representação em 2D de defeitos de lacuna e autointersticial.

A lacuna é um defeito que está em equilíbrio com o material e sua quantidade depende da temperatura na qual o material se encontra, de acordo com a seguinte relação: $N_v = N \exp\left(-\frac{Q_v}{kT}\right)$, onde:

- N_v é o número de vacâncias;

- N é o número de átomos;
- T é a temperatura absoluta em Kelvin;
- K é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K, $8,62 \times 10^{-5}$ eV/K) e
- Q_v é a energia necessária para a formação de vacâncias.

Vejamos um exemplo de como essa relação, observada experimentalmente, pode servir-nos:

Suponha que queiramos calcular o número de lacunas em equilíbrio, por metro cúbico de cobre, a 1.000 °C, sabendo que a energia para a formação de uma lacuna é de 0,9 eV/átomo e que o peso atômico e a massa específica (a 1.000 °C) para o cobre são, respectivamente, 63,5 g/mol e 8,4 g/cm³.

Para resolver esse problema, primeiro é necessário saber quantos átomos temos em 1 m³ de cobre. Para isso, utilizaremos a seguinte relação, considerando A_{cu} (peso atômico), ρ_{cu} (massa específica) e N_A (número de Avogadro, que é $6,022 \times 10^{23}$ átomos/mol).

$$N = \frac{N_{A\rho_{cu}}}{A_{cu}} = \frac{(6,022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})(8,4 \text{ g/cm}^3)(10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3)}{63,5 \text{ g/mol}}$$

$$N = 8 \times 10^{28} \text{ átomos/m}^3$$

Então, o número de lacunas a 1.000 °C ou 1273 K é:

$$N_v = (8 \times 10^{28} \text{ átomos/m}^3) \exp \left[\frac{0,9 \text{ eV}}{(8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(1273)} \right]$$

$$N_v = 2,2 \times 10^{25} \text{ lacunas/m}^3$$

Você achou fácil? Ou ainda não conseguiu entender? Vamos praticar um pouco!

Atividade 1

Atende ao objetivo 1

O número de lacunas de equilíbrio do alumínio a 500 °C é $7,57 \times 10^{23}$ lacunas/m³. Calcule a energia de ativação para formação de uma lacuna no alumínio. Dados: 1 mol de alumínio: 26,89 g e densidade do alumínio: 2,62 g/cm³.

Resposta comentada

1 mol de Al = 26,89 g

26,89 g correspondem a 10,26 cm³

Para converter 10,26 cm³ em m³, devemos dividir esse valor por 10⁶, o que rende: 10,26 cm³ = 1,026x10⁻⁵ m³.

Se o número de lacunas de equilíbrio é 7,57 x 10²³ lacunas/m³, deve-se multiplicar esse número pelo volume de 1 mol de Al para achar o número de lacunas (N) nessa quantidade de material.

$$N = 7,57 \times 10^{23} \times 1,026 \times 10^{-5}$$

$$N = 7,77 \times 10^{18} \text{ lacunas.}$$

A constante de Boltzmann é 1,38 x 10⁻²³ J/K ou 8,62 x 10⁻⁵ e V/K e a temperatura em Kelvin é 773 K.

Então:

$$N = N_L \exp\left(\frac{-Q}{kT}\right)$$

$$7,77 \times 10^{18} = 6,02 \times 10^{23} \exp\left(\frac{-Q}{8,62 \times 10^{-5} \times 773}\right)$$

$$1,29 \times 10^{-5} = \exp\left(\frac{-Q}{6,66 \times 10^{-2}}\right)$$

$$Q = 0,75 \text{ eV}$$

Autointersticial

Podemos ter, ainda, o átomo do reticulado ocupando o interstício. Esse defeito é chamado de autointersticial e, quando ele ocorre, geralmente esse átomo se encontra comprimido, como podemos observar na ilustração da **Figura 2.8**.



Você deve estar percebendo que, até agora, nesta aula, não utilizamos nenhuma fotografia. Isso ocorre porque ainda não conseguimos fazer imagens do nível atômico de estruturas cristalinas através de microscopia. A maior parte do conhecimento a respeito das estruturas cristalinas é adquirida através de técnicas de raio-x, técnica que possibilita a obtenção de informações sobre as estruturas cristalinas.

Impurezas e solução sólida

As impurezas são átomos de um dado elemento químico que se incorporam dentro do reticulado cristalino de outro elemento. Por exemplo, o aço é uma liga de ferro com carbono. Isso significa que os átomos de carbono, que estão em menor número, alojam-se dentro do reticulado cristalino do ferro.

Mas, para tratarmos das impurezas, é preciso, antes, definir um conceito muito importante para estudo de materiais: a solução sólida.

A solução sólida é a acomodação de átomos ou íons de um componente (impureza ou soluto) na estrutura do outro (solvente).

Então, usando o exemplo acima, o aço é uma solução sólida de carbono (soluto) em ferro (solvente). Outro exemplo de solução sólida seria o latão, que é uma solução sólida de zinco em cobre.

De acordo com a posição da impureza dentro do reticulado, temos impurezas dos tipos:

- impureza substitucional (ou solução sólida substitucional) e
- impureza intersticial (ou solução sólida substitucional intersticial).

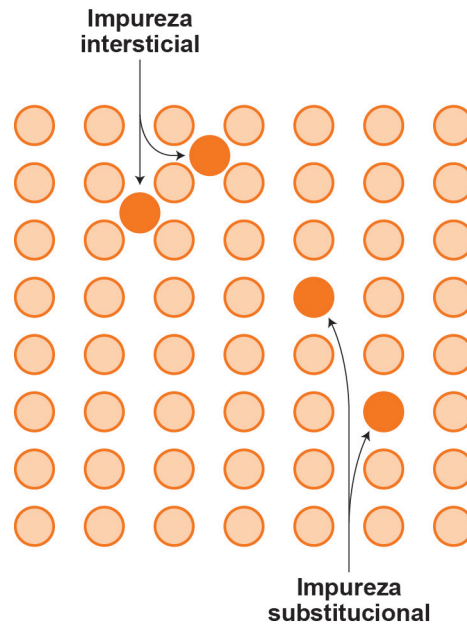


Figura 2.9: Representação, em duas dimensões, dos defeitos pontuais relacionados à impureza.



O interstício é a região da estrutura cristalina que não é ocupada por átomos. O volume dos espaços vazios está diretamente relacionado ao fator de empacotamento atômico (FEA), estudado na primeira aula.

Para cada estrutura, temos vazios em quantidade e volumes variados, conforme podemos observar na figura abaixo, que mostra vazios octaédricos e tetraédricos para (a) estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) e (b) estrutura cúbica de face centrada (CFC):

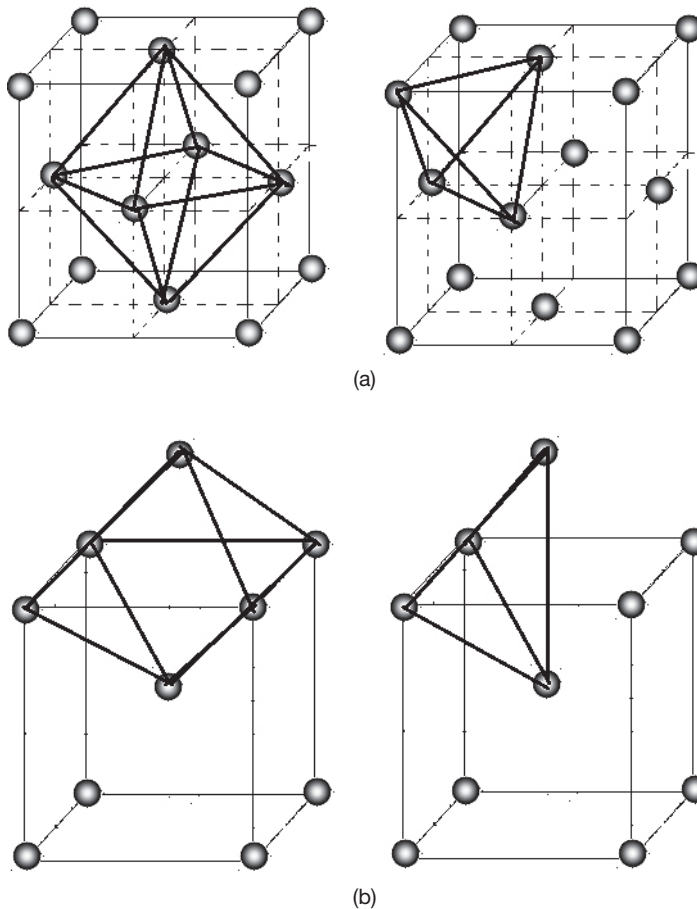


Figura 2.10

A *impureza substitucional* (ou solução sólida substitucional) ocorrerá quando a impureza (soluto) ocupar, dentro do reticulado, uma posição que teria que ser ocupada pelo solvente, conforme você pode conferir na **Figura 2.9**.

A *impureza intersticial* (ou solução sólida substitucional intersticial) ocorrerá quando a impureza ocupar um espaço vazio dentro do reticulado, conforme você também pode conferir na **Figura 2.9**.

Então, um átomo será substitucional ou intersticial. No caso do aço, que mencionamos anteriormente, o carbono só ocupa interstícios do reticulado do ferro. O que faz variar as características do aço é a quantidade de carbono e a presença de outros elementos e sua quantidade.

Empírico

É algo que resulta da prática, da observação, e não da teoria.

Alguns pesquisadores propõem regras **empíricas** sobre a solubilidade em soluções sólidas. Essas regras ficaram conhecidas como *regras de Hume-Rothery* e são:

*Tamanho atômico: Quanto **maior** for a diferença entre os tamanhos dos átomos do soluto e do solvente, **menor** será a faixa de soluções. Se os raios diferirem mais de 15%, a solubilidade é pequena.*

Estrutura cristalina: o tipo de estrutura cristalina deve ser o mesmo.

*Valência química: o metal de **menor** valência (soluto) provavelmente se dissolverá no metal de **maior valência** (solvente). Esta regra é válida para as ligas de cobre (Cu), prata (Ag) e ouro (Au) com metais de maior valência. Para ocorrer extensa faixa de solubilidade, as valências dos dois elementos não devem diferir em mais de uma unidade.*

*Eletronegatividade: as eletronegatividades devem ser quase iguais; quanto mais eletropositivo for um componente e mais eletronegativo o outro, **maior** será a tendência à formação de compostos entre eles e menor será a solubilidade.*

As soluções sólidas substitucionais podem existir com solubilidade total ou parcial entre os componentes. Se uma ou mais regras de Hume-Rothery forem violadas, somente uma solubilidade parcial será possível.

Veja a Tabela 2.1. Nela, podemos observar as características do cobre e do níquel. Eles, quando misturados, formam solução sólida substitucional e são solúveis em qualquer proporção porque atendem a todas as regras de Hume-Rothery. Perceba como suas características são realmente muito próximas!

Tabela 2.1: Características relevantes para formar solução sólida substitucional

	Cu	Ni
Raio atômico	0,128 nm	0,125 nm
Estrutura	CFC	CFC
Eletronegatividade	1,9	1,8
Valência	(+1) ou (+2)	+2

Já as soluções sólidas intersticiais acontecem entre átomos de tamanhos bastante diferentes e, por isso, há limite na quantidade de soluto que se incorpora no reticulado do solvente, ou seja, há limite de solubilidade do soluto no solvente.

Defeitos de Schottky e Frenkel

As *vacâncias e as impurezas ocorrem em sólidos metálicos*, ou seja, em materiais formados por ligações metálicas, que favorecem a ocorrência desses defeitos.

Os *defeitos de Schottky e Frenkel ocorrem em sólidos iônicos*, ou seja, materiais formados por ligações iônicas, como as cerâmicas, por exemplo. Esses sólidos são formados por íons positivos e negativos, mas os vazios também são necessários nesse tipo de material. Eles, porém, precisam ser formados de modo que o sólido permaneça neutro eletricamente, caso contrário haverá a formação de um centro de carga.

Existem duas maneiras para a criação desses defeitos em sólidos iônicos, sem que haja desequilíbrio de carga:

- os grupos vazios correlacionados ou defeitos de Schottky e
- os grupos vazios intersticiais ou defeitos de Frenkel.

Defeitos de Schottky

Quando uma lacuna catiônica é associada à lacuna aniônica, o par é chamado de defeito de Schottky (**Figura 2.11**).

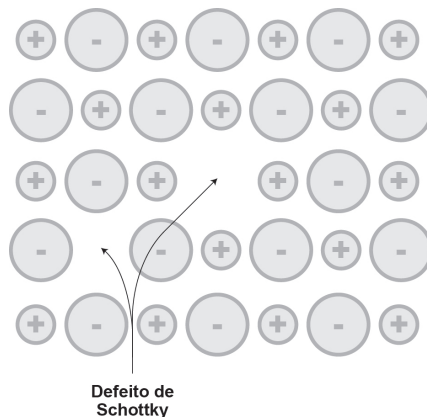


Figura 2.11: Lacunas na estrutura deixadas por um par de íons com cargas opostas, gerando o chamado *defeito de Schottky*.

Defeitos de Frenkel

Um cátion pode abandonar seu sítio, criando uma lacuna catiônica e ficando alocado em um interstício da estrutura; esse par de defeitos

associados (uma lacuna catiônica e um cátion intersticial) é chamado **defeito de Frenkel (Figura 2.12)**.

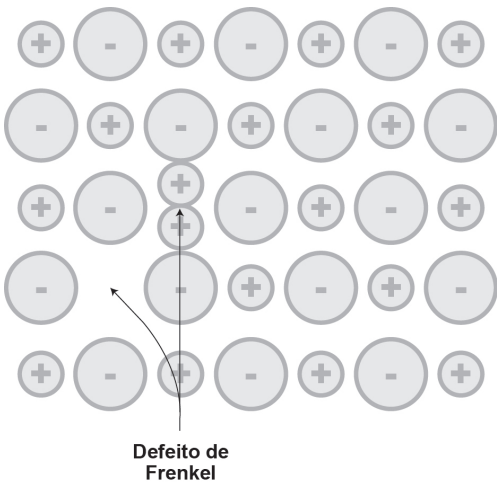


Figura 2.12: Íon que se desloca do sítio original e se acomoda em um interstício, gerando o *defeito de Frenkel*.

Em geral, é mais provável que se formem imperfeições Schottky do que imperfeições Frenkel porque são poucas as estruturas que contêm interstícios suficientemente grandes para dissolver cátions sem deformação considerável.

===== **Atividade 2** =====

Atende ao objetivo 1

Dada a Tabela 2.2, analise com quais destes elementos seria esperada a formação dos seguintes tipos de composto com o cobre:

Tabela 2.2

Elemento	Raio atômico (nm)	Estrutura cristalina	Eletronegatividade	Valência
Cu	0,1278	CFC	1,9	+2
C	0,071			
H	0,046			
O	0,06			

Ag	0,1445	CFC	1,9	+1
Al	0,1431	CFC	1,5	+3
Co	0,1253	HC	1,8	+2
Cr	0,1249	CCC	1,6	+3
Fe	0,1241	CCC	1,8	+2
Ni	0,1246	CFC	1,8	+2
Pd	0,1376	CFC	2,2	+2
Pt	0,1387	CFC	2,2	+2
Zn	0,1332	HC	1,6	+2

- uma solução sólida substitucional com solubilidade total;
- uma solução sólida substitucional com solubilidade parcial;
- uma solução sólida intersticial.

Resposta comentada

- Para existir uma solução sólida substitucional com solubilidade total é preciso atender às regras de Hume-Rothery (Tabela 2.2). Então, para ser soluto do cobre, temos o níquel.
- Para existir uma solução sólida substitucional com solubilidade parcial é preciso deixar de atender ao menos uma das regras de Hume-Rothery. Então, para ser soluto do cobre, temos a prata, o alumínio, o cobalto, o cromo, o ferro, a platina, o paládio e o zinco.
- Nas soluções sólidas intersticiais, as impurezas (ou soluto) ocupam os espaços vazios entre os átomos de solvente. Para materiais metálicos que possuem alto FEA, essas posições intersticiais são relativamente pequenas. O diâmetro atômico desse tipo de impureza deve ser menor do que o do átomo de solvente. Então, para ser soluto do cobre, temos o carbono, o hidrogênio e o oxigênio.

Deformação plástica

É o regime de deformação em que acontece mudança dimensional permanente, que ocorre quando se excedem os limites de deformação elástica. Em outras palavras, é a deformação permanente decorrente do deslocamento de átomos ou moléculas para novas posições no reticulado.

Fonte: <http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/453-deformacao-plastica>

Defeitos lineares ou discordâncias

São *imperfeições na rede cristalina que ocorrem em uma fila de átomos*. Os defeitos lineares são conhecidos como discordâncias. Estas podem surgir durante a solidificação (cristalização) ou podem se formar durante a **deformação plástica**.

Existem três tipos básicos de defeitos lineares ou discordâncias:

- em cunha (ou aresta);
- em hélice (ou espiral);
- mista.

Discordância em cunha

As discordâncias em cunha são porções extras de um plano de átomos, ou seja, um semiplano, cuja aresta termina no interior do reticulado cristalino. Essa aresta é chamada de linha de discordância.

As discordâncias provocam distorções em seu entorno. Os átomos acima da linha de discordância estão comprimidos enquanto que os que estão abaixo dela estão afastados. Essa distorção diminui ao se distanciar da discordância. Podemos observar na Figura 2.13 que a discordância é representada pelo símbolo \perp , que indica a posição da linha de discordância. Se o semiplano de átomos estivesse na posição contrária, o símbolo estaria invertido, aparecendo desta forma: \perp .

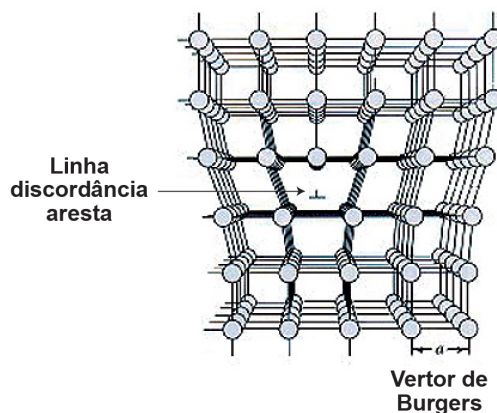


Figura 2.13: Discordâncias em cunha em três dimensões.

Fonte: <http://goo.gl/rrW7ys>



As discordâncias em Cunha são nomeadas assim pois possuem o formato de prisma parecido com o de uma ferramenta bem antiga, chamada cunha, que era utilizada com a finalidade de fender algum material, como, por exemplo, madeira ou pedras.



Figura 2.14: Cunha.

O vetor de Burgers e a discordância em cunha

O vetor de Burgers representa a direção da distorção da rede associada à discordância e é geralmente representado pelo vetor \vec{b} .

Podemos representar uma discordância qualquer através da relação entre a linha de discordância e o vetor de Burgers.

Repare, na **Figura 2.15(b)**, que, para uma discordância em cunha, o vetor de Burgers é perpendicular à linha de discordância.

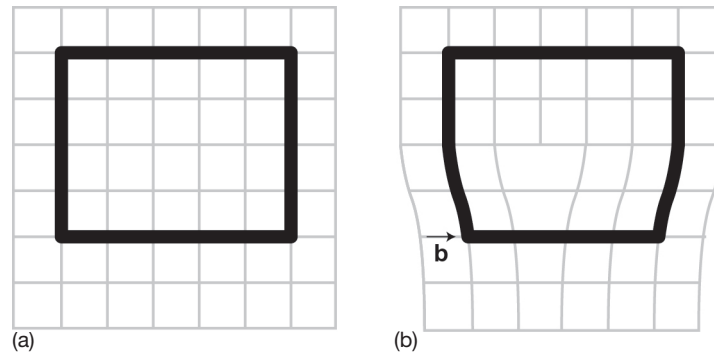


Figura 2.15: (a) Cristal perfeito em duas dimensões; (b) cristal com discordância em cunha, em duas dimensões. O vetor \vec{b} é o vetor de Burguers.

Discordância em espiral ou em hélice

A discordância espiral ou em hélice pode ser considerada como resultado da **tensão cisalhante** aplicada para produzir a distorção (**Figura 2.16**). A discordância recebe esse nome porque temos a formação de uma trajetória espiral ou helicoidal ao longo da linha de discordância. Observe a **Figura 2.16(b)**. Ela é a vista superior da **Figura 2.16(a)**.

Tensão cisalhante

É também conhecida como tensão de cisalhamento, tensão tangencial, ou ainda tensão de corte ou tensão cortante é um tipo de tensão gerado por forças aplicadas em sentidos iguais ou opostos, em direções semelhantes, mas com intensidades diferentes no material analisado. Um exemplo disso é a aplicação de forças paralelas, mas em sentidos opostos, ou a típica tensão que gera o corte em tesouras.

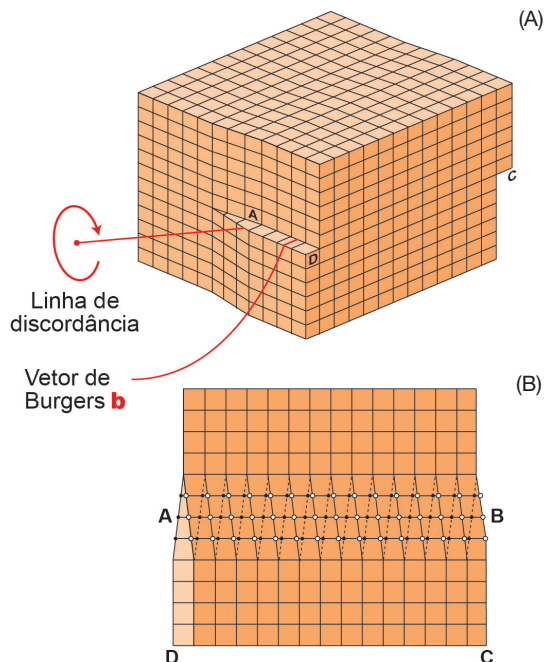


Figura 2.16: Discordância em hélice: (a) em três dimensões; (b) vista superior do plano onde existe a discordância.

O vetor de Burgers e a discordância em espiral ou em hélice

Já na **Figura 2.17**, podemos observar que, para discordâncias em hélice, o vetor de Burgers é paralelo à linha de discordância.

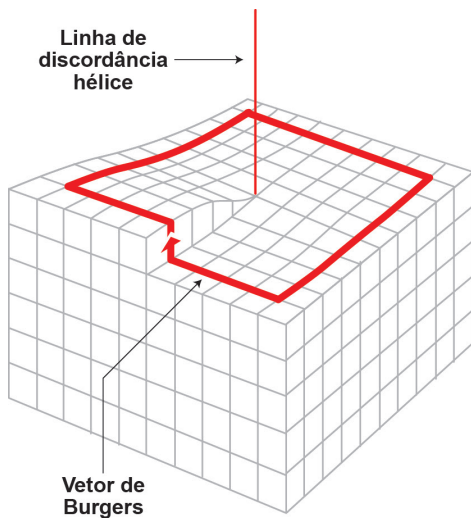


Figura 2.17: Discordância em hélice e vetor de Burgers.

Discordância mista

As discordâncias encontradas nos materiais cristalinos não são nem puramente em cunha, nem em hélice, mas possuem componentes de ambos os tipos. Elas são denominadas *discordâncias mistas* (**Figura 2.18**). Reparem que a discordância começa em hélice de um lado e as distorções na rede acontecem de modo que ela se transforma em discordância em cunha.

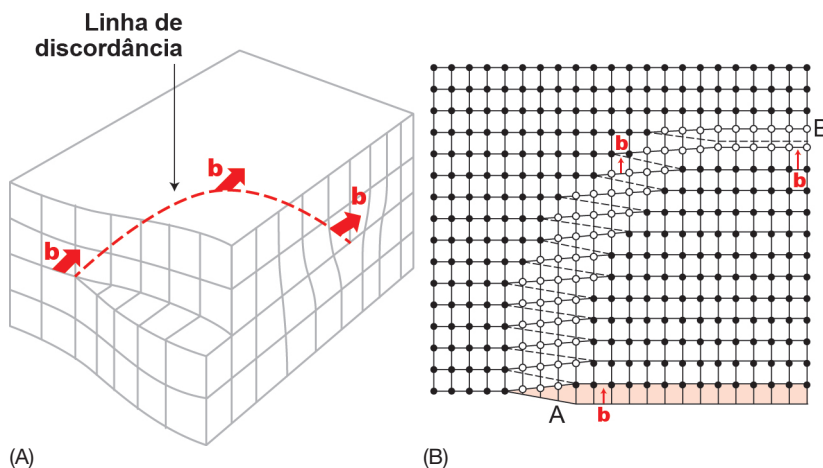


Figura 2.18: Discordância mista. (a) Em três dimensões; (b) vista superior do plano onde há discordância.



Microscopia óptica: A microscopia óptica possibilita o aumento de imagens através da incidência de feixes de luz sobre a amostra. Esses feixes passam por um conjunto de lentes objetivas e oculares, formando uma imagem aumentada.

Microscopia eletrônica de transmissão (MET): Nela, a imagem é formada por um feixe de elétrons que passa através da amostra.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV): Através da MEV, a superfície da amostra é varrida com um feixe de elétrons; o feixe de elétrons retroespalhado é coletado e, então, exibido na mesma taxa de varredura em um tubo de raios catódicos (semelhante à tela de uma televisão).

Observe na figura abaixo: (a) o gráfico mostrando as faixas de tamanho das características estruturais dos materiais e (b) o gráfico das faixas de resolução para as técnicas de microscopia além do olho nu.

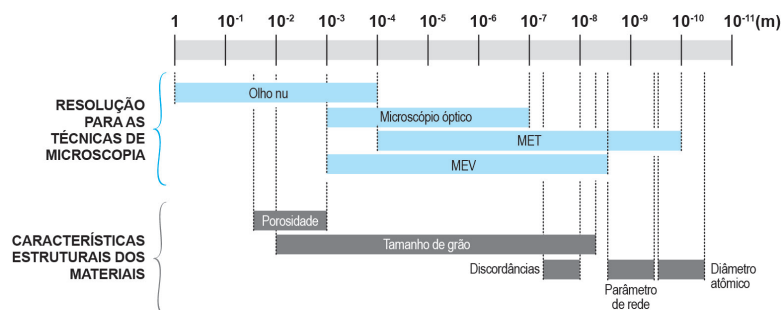


Figura 2.19: (a) resolução de técnicas de micrografia, que é o estudo ou descrição dos objetos em escala microscópica; (b) escala de parâmetros importantes dos materiais.

As discordâncias, de uma forma geral, são importantes porque têm forte influência sobre as propriedades mecânicas, mais especificamente sobre o processo de deformação plástica dos metais e de algumas cerâmicas. Nos metais, o principal mecanismo de deformação plástica é o movimento das discordâncias. Nas próximas aulas, veremos o conceito de deformação plástica e como ela acontece.

Defeitos planares ou interfaciais

Esse tipo de defeito se apresenta através de imperfeições no reticulado cristalino em duas dimensões. Esse defeito envolve fronteiras e geralmente separa, nos materiais, regiões que possuem diferentes estruturas cristalinas ou diferentes *orientações cristalográficas*.

Grão é um cristal isolado na matéria em estado sólido. Grãos adjacentes geralmente possuem diferentes orientações cristalográficas e um contorno de grão em comum. Podemos observar na Figura 2.20 a representação de grãos separados por uma região chamada de contorno de grão. Em cada grão os átomos possuem a mesma ordenação atômica, porém em direções diferentes. Isso é conhecido por orientação cristalográfica.

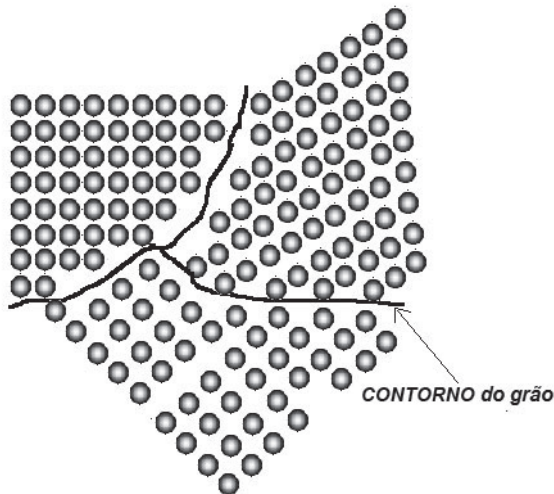


Figura 2.20: Representação de grãos com diferentes direções cristalográficas separadas por uma região chamada de contorno de grão.

Contornos de grão

Corresponde à região que separa dois ou mais cristais (ou grãos) de orientações cristalográficas diferentes, como você pode ver à frente, na **Figura 2.24(d)**, que ainda explicaremos. No interior de cada grão, todos os átomos estão arranajados segundo uma única orientação, caracterizada pela célula unitária.

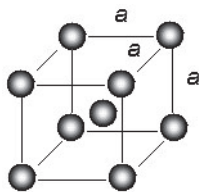


Figura 2.21: Célula unitária cúbica de corpo centrada – CCC.

Monocristais e policristais

A partir das definições de grão e de orientação cristalográfica, podemos classificar os materiais em monocristais ou policristais. Os *monocristais* são materiais que *possuem apenas um grão*; já os *policristais* *possuem vários grãos, com diferentes orientações cristalográficas*.

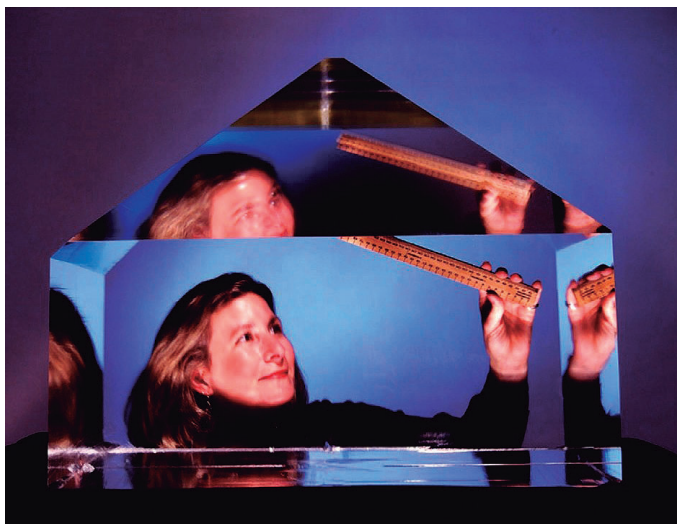


Figura 2.22: Monocristal representado através de um enorme cristal de fosfato de monopotássio, que cresceu a partir de um cristal-semente em uma solução aquosa supersaturada no Laboratório Nacional de Lawrence Livermore (LNLL), na Califórnia.
Fonte: <https://goo.gl/wo105L>

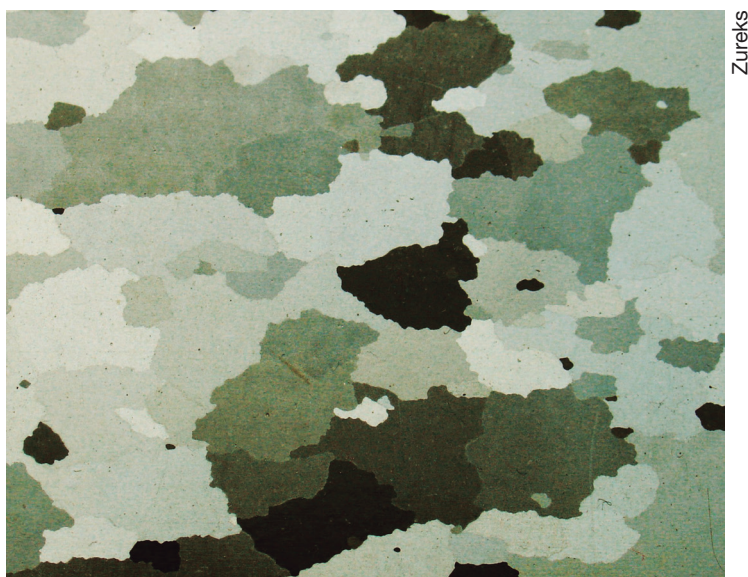


Figura 2.23: Policristal representado por uma fotografia de aço laminado (revestimento removido), mostrando a sua estrutura policristalina. A diferença de coloração, neste caso, ocorre porque os grãos possuem orientação cristalográfica diferente. Nós só conseguimos observar esses grãos no microscópio mediante uma preparação da superfície (lixamento, polimento e ataque químico específico).

Fonte: <https://goo.gl/zDXznT>.

Formação do contorno de grão

Durante o processo de solidificação, os átomos começam a se ordenar (segundo a sua estrutura cristalina preferencial, como pode ser verificado na **Figura 2.24(a)**). Essa ordenação começa em vários pontos ao mesmo tempo dentro do material, porém, em cada grupo de átomos (chamados núcleos), temos uma orientação diferente.

Com o avanço da solidificação, esses núcleos (agora já chamados de grãos) aumentam porque mais átomos se juntam aos núcleos iniciais. Isso pode ser visto na **Figura 2.24(b)**. Esses grãos começam a se tocar (**Figura 2.24(c)**), mas, como a orientação entre eles é diferente, cria-se uma desordem atômica chamada de contorno de grão.

A desordem atômica a qual nos referimos está representada pelas regiões entre os grãos da **Figura 2.24(c)**. Nessas regiões, após a completa solidificação (**Figura 2.24(d)**), existem átomos, mas esses não seguem nem a ordenação, nem a orientação dos átomos vizinhos. Esses átomos desorganizados formam, então, o que chamamos de contorno de grão.

Os contornos de grão são representados por linhas (**Figura 2.24(d)**). Isso porque, quando observamos um policristal pelo microscópio, vemos

linhas que definem os contornos de grão. Nós só conseguimos observar esses grãos no microscópio mediante uma preparação da superfície (lixamento, polimento e ataque químico específico). Quando fazemos o ataque químico, os átomos desorganizados são atacados, preferencialmente.



Figura 2.24: Evolução da solidificação para formação dos grãos.

A forma do grão é controlada pela presença dos grãos vizinhos e o tamanho do grão é controlado pela composição e pela taxa de solidificação (cristalização).

Conhecer o tamanho de grão de um material policristalino é importante porque o número de grãos influencia nas propriedades dos materiais, principalmente na resistência mecânica. Portanto, controlando o tamanho de grão, podemos controlar suas propriedades mecânicas.

Outro ponto de destaque é que na região do contorno de grão, o empacotamento atômico é menos eficiente e, portanto, a energia é mais elevada.

Quando mencionamos empacotamento atômico, referimo-nos ao quão juntos estão os átomos. O FEA mede exatamente isso, mas o faz para uma célula unitária. Quando dizemos que o FEA do CCC é 0,68 e o do CFC é 0,74, por exemplo, isso significa que os átomos do CFC estão mais próximos uns dos outros.



American Society for Testing and Materials (ASTM)

A ASTM internacional, ou *American Society for Testing and Materials*, é um órgão americano, fundado em 1898, que desenvolve e publica normas técnicas para materiais, produtos, sistemas e serviços. A ASTM não é um órgão nacional de normatização, assim como é a *American National Standards Institute* (ANSI), nos EUA, e o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), no Brasil. Entretanto, a ASTM tem um papel dominante entre os padrões de desenvolvedores nos EUA e afirma ser a maior incorporadora mundial de normas.



Figura 2.25

Fonte: <https://goo.gl/LGXt5g>

Para mais informações, acesse: <http://www.astm.org/>

Tamanho de grão

O tamanho de grão é padronizado pela norma ASTM, a saber:

$$N=2^{n-1}$$

em que:

- n é o número inteiro definido como o tamanho do grão ASTM e
- N é o número de grãos por polegada quadrada, em um material preparado para **metalografia** e observado em microscópio óptico com aumento de 100 vezes.

Metalografia

É o estudo da morfologia e estrutura dos metais.

Para a realização da análise, o plano de interesse da amostra é cortado, lixado, polido e atacado com reagente químico, de modo a revelar as interfaces entre os diferentes constituintes que compõem o metal. O estudo pode ser microscópico ou macroscópico (feito a olho nu).

Atividade 3

Atende ao objetivo 2

Determine o número do tamanho de grão ASTM para uma amostra metálica se são medidos 45 grãos por polegada quadrada sob uma ampliação de 100 vezes.

Resposta comentada

Para determinar o tamanho de grão ASTM (n), utiliza-se a equação:
 $N = 2^{n-1}$

fazendo o logaritmo em ambos os lados da expressão, temos:

$$\log N = (n - 1) \log 2$$

$$n = \frac{\log N}{\log 2} + 1$$

$N = 45$, então:

$$n = \frac{\log 45}{\log 2} + 1 = 6,5$$



Para saber sobre a metalografia da estrutura do aço, acesse: <https://www.youtube.com/watch?v=Shsd9AtcZDM>.

Na Aula 5, estudaremos em detalhe a metalografia do aço.

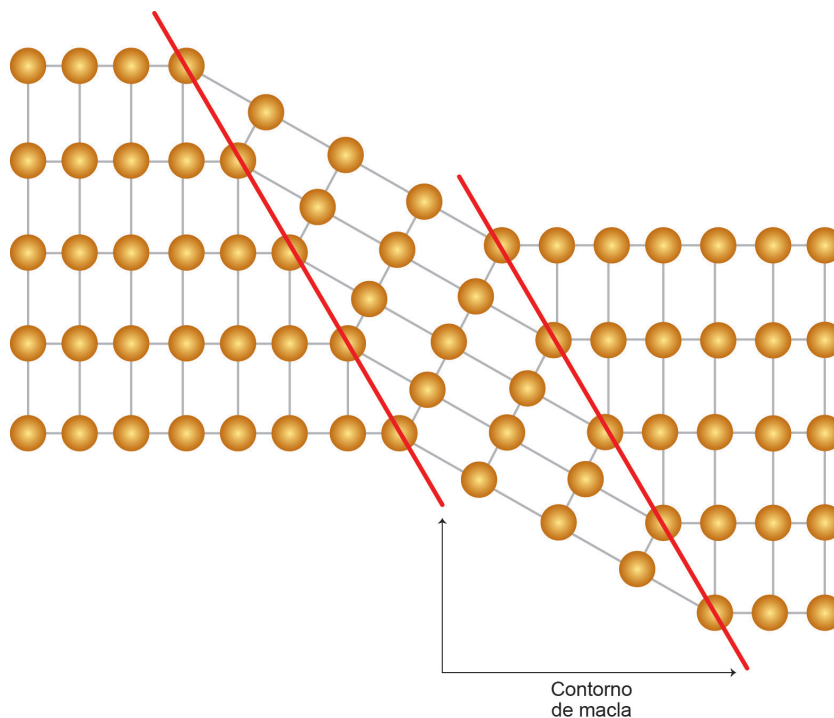
A **Tabela 2.2** mostra a padronização ASTM para tamanho de grão.

Tabela 2.2: Padronização do tamanho de grão pela norma ASTM.

Nº do tamanho de grão - n	Quantidade média de grãos - N (mm ²)	Diâmetro médio do grão (mm)
1	16	0,75
2	32	0,5
3	64	0,35
4	128	0,25
5	256	0,18
6	512	0,125
7	1024	0,062
8	2048	0,044
9	4096	0,032
10	8200	0,022

Contornos de macla

Um contorno de macla é um tipo de contorno em que existe uma simetria da rede cristalina (como se fosse um espelho). Os átomos de um lado do contorno estão posicionados como imagem dos átomos do outro lado (**Figura 2.26**).

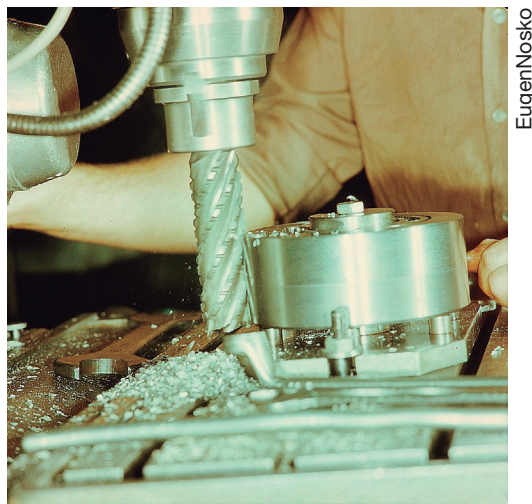
**Figura 2.26:** Contorno de macla.

Os contornos de macla são formados a partir de esforços de cisalhamento, sendo chamadas de maclas de deformação, ou durante tratamento térmico de recozimento, sendo chamadas de maclas de recozimento.



Tratamento térmico de recozimento é um ciclo térmico em que o metal sofre aquecimento controlado até atingir determinada temperatura, permanece nessa temperatura por certo tempo e sofre resfriamento lento no próprio forno. Os objetivos principais do recozimento são:

- remover tensões (adquiridas durante o processamento);
- ajustar o tamanho dos grãos;
- diminuir a dureza;
- melhorar a ductilidade;
- regularizar a estrutura bruta de fusão.



EugenNosko

Fonte: <https://goo.gl/RYBNgS>.

A figura ilustra o processo de usinagem do aço. O tratamento térmico de recozimento é uma das preparações necessárias para o processo de usinagem (procedimento que tem o objetivo de dar forma a uma

matéria-prima, através de ferramentas ou máquinas). Para saber mais, acesse: <https://goo.gl/TY6SGb>.

A macla ocorre em direção e plano definidos e depende da estrutura cristalina. Os *metais CFC apresentam, geralmente, maclas de recozimento*, enquanto que os *metais HC e CCC* usualmente *apresentam maclas de deformação*.

Defeitos volumétricos

Os defeitos volumétricos que ocorrem em três dimensões são maiores do que aqueles que foram apresentados até agora. Podemos dividi-los em: inclusões, precipitados, fases diferentes e porosidades.

Inclusões:

As inclusões são impurezas estranhas ao material, como óxidos e sulfetos.

Precipitados:

São aglomerados de partículas em que a composição difere da matriz.

Fases:

Ocorrem quando o limite de solubilidade do soluto (impurezas) é ultrapassado.

Porosidades:

Acontecem quando existe a presença de gases durante o processo de solidificação em metais ou durante o processo de compactação de pós em cerâmicas.

Atividade 4

Atende aos objetivos 2 e 3

Com base nas características dos defeitos pontuais, avalie as afirmações dadas.

I. Os defeitos puntiformes (lacunas, impurezas substitucionais e impurezas intersticiais) causam distorções na rede cristalina, mas não influenciam as propriedades do material.

II. Ao contrário dos sólidos iônicos, os metais não têm sua neutralidade elétrica alterada pela presença de defeitos cristalinos.

III. Os átomos de soluto dissolvidos no metal desempenham um papel importante na deformação plástica, causando o endurecimento por solução sólida.

IV. Denomina-se lacuna ou vacância uma posição desocupada do reticulado. Ela desempenha papel muito importante na difusão.

V. Átomos estranhos, de impurezas ou adicionados intencionalmente, não são considerados defeitos puntiformes.

Resposta comentada

I. Falsa. Todos os defeitos causam distorções na rede e influenciam nas propriedades do material. Cada defeito tem a sua influência, o que veremos em aulas posteriores.

III. Verdade. Devido aos metais apresentarem ligação metálica, não há neutralidade elétrica.

IV. Verdade. Os átomos de soluto aumentam a resistência do material.

V. Verdade. Difusão é a movimentação dos átomos.

VI. Falso. Toda impureza é um defeito pontual.

Conclusão

Os defeitos que se formam, durante a solidificação ou durante o processamento, têm relação direta com as propriedades dos materiais. Controlando quantidade e tipo de defeito, é possível desenvolver materiais da mesma classe com variações nas propriedades (mecânicas, elétricas, térmicas, óticas), atendendo às diversas aplicações na engenharia.

Observe que quando você deforma um arame, quanto mais deformado, mais resistente ele fica. Isso porque, ao deformá-lo, aumentamos a quantidade de discordâncias existentes no material. As discordâncias são responsáveis pela deformação plástica do material, mas, em excesso ela prejudica a deformação plástica. Então, controlar a quantidade de discordâncias é uma forma de controlar a resistência do material.

Resumo

1. Os sólidos cristalinos não possuem estrutura perfeita.
2. Os defeitos cristalinos classificam-se em:
 - pontuais (vacâncias, impurezas substitucionais e intersticiais);
 - lineares (discordâncias);
 - superficiais (contornos de grão e de macla);
 - defeitos volumétricos (trincas, precipitados, inclusões, fases e poros).
3. Os defeitos pontuais são importantes para o processo de difusão atômica (movimento dos átomos) e para a formação das soluções sólidas, como, por exemplo, na produção de aço, latão, bronze.
4. A solução sólida é a introdução de um elemento químico (soluto) no reticulado cristalino de outro (solvente), como, por exemplo, o carbono como soluto no ferro, dando origem ao aço, e o zinco, como soluto do cobre, conhecido como latão.
5. Para sólidos iônicos, os defeitos são os de Schottky e de Frenkel.
6. As discordâncias são defeitos em uma dimensão e sua existência se relaciona com o processo de deformação plástica, que é a deformação permanente dos materiais.
7. Os materiais podem ser monocristalinos ou policristalinos. Os sólidos policristalinos apresentam os contornos de grão, que são imperfeições superficiais (desordem atômica local) que separam cristais de

diferentes orientações, que se formam durante o processo de solidificação. Os grãos apresentam orientações distintas entre si.

8. Os defeitos volumétricos podem ser microscópicos ou macroscópicos (todos os outros defeitos citados anteriormente, como as vacâncias, átomos intersticiais ou substitucionais, as discordâncias e os contornos de grão são microscópicos).

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, estudaremos as propriedades mecânicas dos materiais e como podemos relacionar o comportamento de um material à aplicação de força externa.

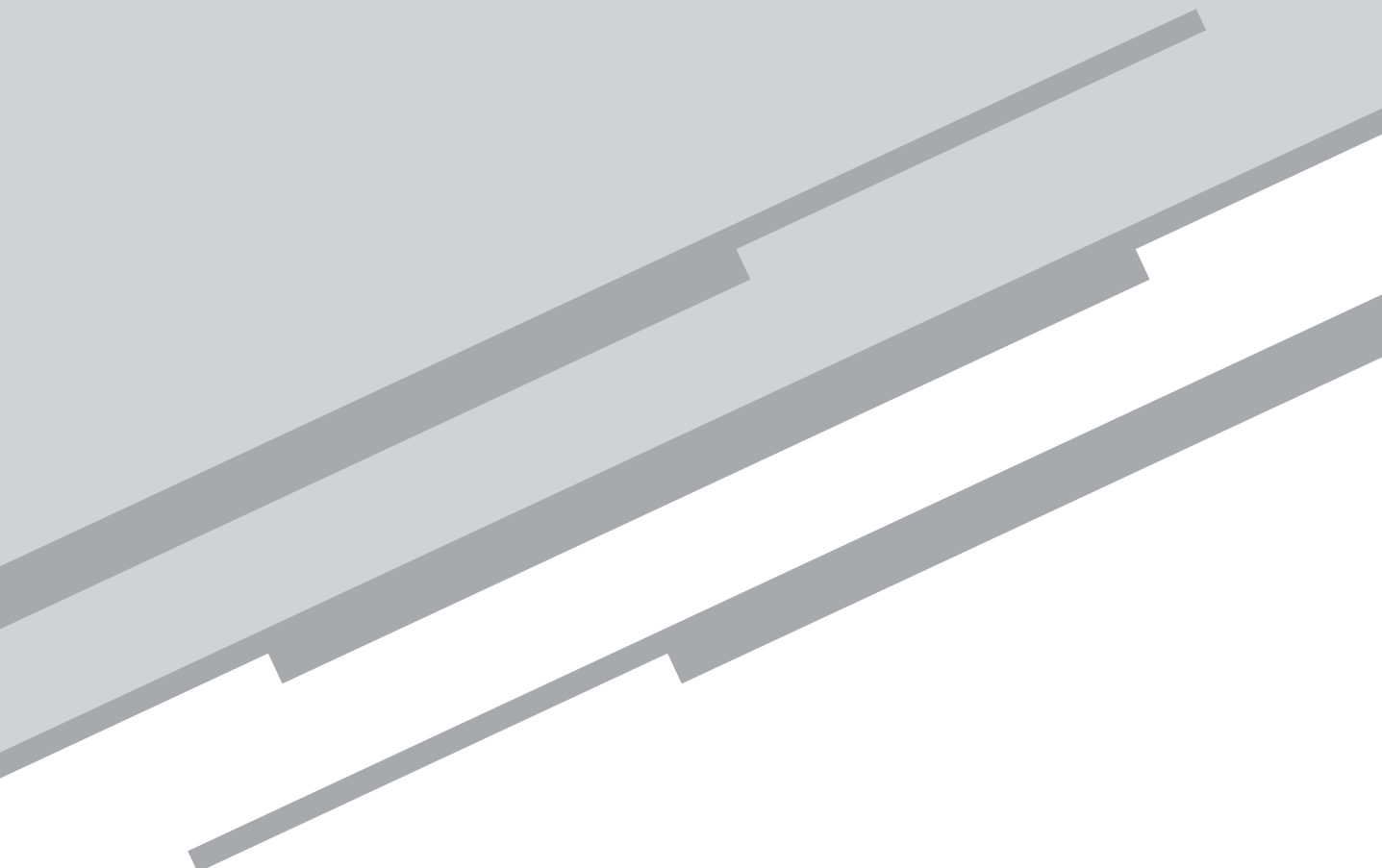
Referências

CALLISTER JR, Willian D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e Engenharia de materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

VLACK, Laurence H. Van. *Princípio de ciência e tecnologia dos materiais*. Rio de Janeiro: Editora Campos, 1994.

Aula 3

Propriedades mecânicas dos materiais



Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila

Meta

Apresentar as propriedades e o comportamento dos materiais quando submetidos a esforços externos.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. calcular a tensão de tração atuante em um corpo;
2. calcular o comprimento final de um corpo que sofre deformação;
3. representar graficamente o diagrama tensão \times deformação;
4. determinar os pontos característicos do diagrama tensão \times deformação.

Pré-requisito

Para fazer as atividades desta aula você precisará de uma régua.

Introdução

Você já deve ter percebido, mesmo que intuitivamente, que diferentes materiais possuem comportamentos diferentes quando submetidos a uma mesma solicitação, certo? Por exemplo, se aquecermos três materiais: uma leiteira de alumínio (metal), um saco plástico (polímero) e um pedaço de tijolo (cerâmico), na chama do fogão da nossa casa, por cerca de um minuto, o que acontece com cada um?



Figura 3.1: Escreva a seguir o que você acha que aconteceria se aquecesse cada um desses materiais.

Fonte:<http://www.freeimages.com/photo/pan-1424036> - bruno neves; Fonte:<http://www.freeimages.com/photo/garbagebag-1318456> - Lenteui; Fonte:<http://www.freeimages.com/photo/brick-2-1220405> - PawelZawistowski

Por serem materiais de classes diferentes, comportam-se de maneiras diferentes na presença de calor. A leiteira esquentaria e poderia queimar alguém que encostasse nela, mas não apresentaria nenhuma modificação na sua forma. O saco plástico amoleceria e, possivelmente, se fundiria. Já o pedaço de tijolo não apresentaria qualquer reação visível.

As propriedades dentro de uma mesma classe de materiais também variam. Vamos considerar dois materiais metálicos, um de alumínio e outro de aço (liga de ferro com carbono), sendo que têm as mesmas dimensões. É mais fácil, ou seja, é necessária menor força externa para deformar o material de alumínio do que o de aço, mesmo ambos sendo metálicos.

Essas diferenças acontecem porque os materiais são diferentes em suas microestruturas. Mas para entendermos conceitos microestruturais relacionados às propriedades dos materiais, é preciso conhecer essas propriedades.

Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais consistem em como o material se comporta quando é solicitado externamente. Elas se dividem em físicas e químicas. As propriedades físicas se resumem no comportamento do material quando solicitado, sem que haja mudança na composição química. Já as propriedades químicas correspondem ao comportamento do material quando exposto a outro material ou a um determinado ambiente, ou seja, quando ocorre, por exemplo, a corrosão. Vejamos, então, quais são as propriedades físicas:

Propriedades elétricas

Campo elétrico

É o campo de força provocado pela ação de cargas elétricas ou por sistemas delas.

O comportamento dos materiais em resposta à aplicação de um **campo elétrico** externo define suas propriedades elétricas. Essas propriedades dependem do tipo de ligação química e do tipo de estrutura dos materiais.

As principais grandezas relacionadas às propriedades elétricas são:

- *resistividade*: resistência do material à passagem de corrente elétrica. Quanto maior a resistividade de um material, mais difícil é a passagem de corrente elétrica nele.

Na **Tabela 3.1**, podemos observar alguns valores de resistividade.

Tabela 3.1: Valores de resistividade

Material	ρ (ohms.mm ² /m) a 20 °C	Material	ρ (ohms.mm ² /m) a 20 °C
Al	0,0284	borracha	10^{17}
Pb	0,2114	mica	10^{15}
Cu	0,0173	parafina	10^{23}
Fe puro	0,0970	PET	10^{26}

- *condutividade elétrica*: medida da facilidade de conduzir uma corrente elétrica. Depende do tipo de material, mas também do tamanho do corpo.



Para saber mais sobre propriedades elétricas, acesse: www.sofisica.com.br.

Você também pode assistir, no Youtube, às aulas de Física do *Telecurso 2000*.

Através dessas grandezas, podemos classificar os materiais em condutores, semicondutores e isolantes, ou seja, segundo sua capacidade de conduzir eletricidade. Observe, na **Tabela 3.1**, que os materiais com menores valores de resistividade são os metais, que são os melhores condutores de eletricidade que conhecemos. Vale lembrar que essa característica está diretamente relacionada ao tipo de ligação existente nesses materiais: a ligação metálica.

Propriedades térmicas

O comportamento dos materiais em resposta à variação de temperatura define suas propriedades térmicas. Quando fornecemos calor a um material, pode haver:

- variação de volume;
- transmissão de calor, assim como transformação de fase (um material pode passar do estado sólido para o líquido, por exemplo) e variação de temperatura.

As principais grandezas relacionadas às propriedades térmicas são:

- Coeficiente de expansão térmica: medida da variação de uma de suas dimensões. Pode ser linear, superficial ou volumétrico.

Na **Tabela 3.2**, podemos observar alguns valores do coeficiente de expansão térmica linear.

Tabela 3.2: Valores do coeficiente de expansão térmica linear

Material metálico	α_L ($\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	Material cerâmico	α_L ($\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	Material polimérico	α_L ($\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
Al	25	Al ₂ O ₃	6,5-8,8	Polietileno	100-200
Cr	6	SiC	4,8	Polipropileno	58-100
Co	12	Sílica (99,9% pura)	0,55	Nylon	80
Fe	12	MgO	13,5	silicones	20-40

- Calor específico: indica a quantidade de energia necessária para elevar em um grau uma unidade de massa do material. Quanto menor o valor do calor específico (C_p), mais rápidas são as mudanças de temperatura no material. Esse valor depende do tamanho do corpo.
- Condutividade térmica: mede a capacidade do material de conduzir o calor. Depende do tipo de material e do tamanho do corpo.

Propriedades ópticas

Trata-se do comportamento do material em resposta à presença de luz. Quando um feixe de luz incide sobre um corpo, a radiação luminosa pode ser refletida, transmitida ou absorvida. Então, definimos:

I_0 – feixe incidente

I_R – feixe refletido

I_A – feixe absorvido

I_T – feixe transmitido

$$I_0 = I_T + I_A + I_R$$

Transmissividade (T): capacidade de transmitir a luz ($T = I_T/I_0$).

Absortividade (A): capacidade de absorver a luz ($A = I_A/I_0$).

Refletividade (R): capacidade de refletir a luz ($R = I_R/I_0$).

A partir dessas propriedades, podemos classificar os materiais em transparentes, translúcidos e opacos. Em materiais transparentes, $T \approx 1$,

em opacos, $T \approx 0$, e em translúcidos, T é pequeno, ou seja, parte da radiação luminosa é absorvida, o que significa que pouca radiação é transmitida. Se o material não é transparente nem opaco, é translúcido.



Para saber mais sobre propriedades térmicas e ópticas, acesse: www.sofisica.com.br.

Você também pode assistir, no Youtube, às aulas de Física do *Telecurso 2000*.

Propriedades mecânicas

O comportamento dos materiais em resposta à aplicação de uma força externa define suas propriedades mecânicas. Quando um material recebe uma solicitação externa através de uma força, ele pode se deformar e/ou romper. Esta aula vai detalhar essas propriedades e, mais especificamente, as propriedades relacionadas aos esforços trativos.



Crash test

Crash test ou teste de impacto é a avaliação de automóveis para a identificação de pontos que precisam de melhorias durante seu projeto, com o objetivo de garantir a segurança de seus futuros usuários.



Figura 3.2: Teste mede a ductilidade do aço utilizado na fabricação da carroceria da máquina Tucson, da Hyundai.

Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IIHS_Hyundai_Tucson_crash_test.jpg?uselang=pt-br

Um dos pontos importantes desse procedimento é a observação da resistência mecânica do material utilizado na carroceria do automóvel. As propriedades mecânicas desse material influirão completamente no que os pesquisadores chamam de *eficiência de impacto*, que mede como será o desempenho do carro durante uma colisão.

Assista ao vídeo a seguir, para uma visão privilegiada do teste de impacto: <http://terratv.terra.com.br/trs/video/422241>

Tipos de esforços

Um corpo pode ser solicitado externamente pela aplicação de uma força. Dependendo da maneira como essa força é aplicada, têm-se diferentes respostas do material. As principais dentre essas solicitações são: tração, compressão, cisalhamento, torção e flexão. Veja a **Figura 3.3**.

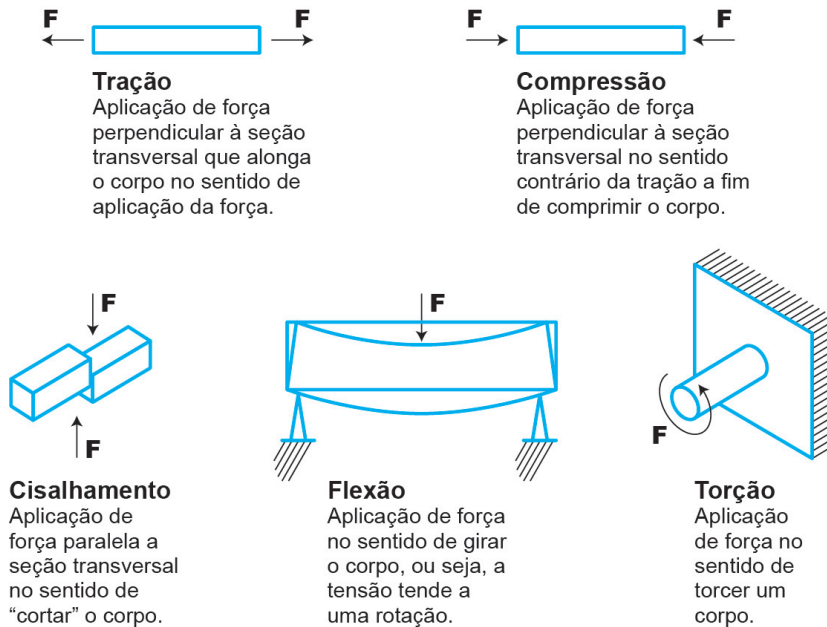


Figura 3.3: Tipos de esforços que podem atuar em um corpo.

Tensão e deformação

Tensão

A tensão mecânica ou, simplesmente, tensão é definida como o valor da distribuição de forças por unidade de área em torno de um ponto material dentro de um corpo material ou meio contínuo. Observe a **Figura 3.4**. Nela, temos uma barra com **seção transversal** retangular e uma força F trativa sendo aplicada perpendicularmente à seção transversal.

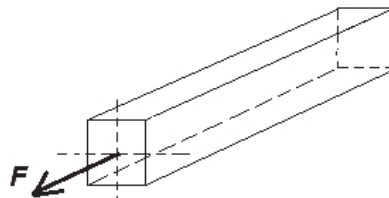


Figura 3.4: Barra com seção transversal retangular e com aplicação de força trativa perpendicular à seção transversal.

Seção transversal ou seção perpendicular

É a representação da seção obtida por um corte segundo um plano perpendicular ao eixo da peça.

A tensão, geralmente representada pela letra grega σ (lê-se *sigma*), é dada por:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Sendo F a força aplicada e A a área da seção onde ela é aplicada. No caso do exemplo da **Figura 3.4**, a área seria referente ao retângulo da seção transversal.

A unidade de tensão é o Pascal (símbolo Pa), que é uma medida de força por unidade de área, sendo $\text{Pa} = [\text{N}/\text{m}^2]$ e $[\text{MPa}] = 10^6 [\text{Pa}]$.



O *pascal* (símbolo: Pa) é a unidade padrão de pressão e tensão no SI (Sistema Internacional de unidades). Equivale à força de 1 N aplicada uniformemente sobre uma superfície de 1 m².

O nome dessa unidade é uma homenagem a Blaise Pascal, eminente matemático, físico e filósofo francês.

Unidades de pressão e fatores de conversão

	Pa	bar	atm	Torr	psi
1 Pa	= 1 N/m ²	= 10 ⁻⁵ bar	≅ 9,87 × 10 ⁻⁶ atm	≅ 7,5 × 10 ⁻³ Torr	≅ 145 × 10 ⁻⁶ psi

Múltiplos do SI

Múltiplo	Nome	Símbolo	Múltiplo	Nome	Símbolo
10 ⁰	pascal	Pa	10 ⁶	megapascal	MPa
10 ¹	decapascal	daPa	10 ⁹	gigapascal	GPa
10 ²	hectopascal	hPa	10 ¹²	terapascal	TPa
10 ³	quilopascal	kPa	10 ¹⁵	petapascal	PPa

Vejamos um exemplo de como utilizar a tensão em cálculos de aplicação de forças. Um corpo de alumínio sofre uma tensão de 450 MPa. Sabendo que a área de aplicação da força foi de 0,01 m², qual é a força aplicada nesse corpo?

Solução:

Temos que: $\sigma = \frac{F}{A}$ Então: $F = \sigma A = 450 \cdot 10^6 \times 0,01 = 45 \cdot 10^5 \text{ N}$.

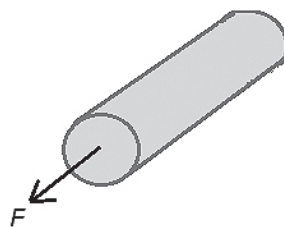
Atividade 1

Atende ao objetivo 1

Uma barra de seção circular de 30 mm de diâmetro é tracionada por uma carga normal de 20 kN. Determine a tensão normal atuante na barra.

Resposta comentada

Para resolver a atividade, o primeiro passo é desenhar a barra e posicionar a carga.



- Força normal

$$F = 20 \text{ kN} = 20000 \text{ N}$$

- Calculando a área da seção circular:

$$A = \pi r^2 = 3,14(15\text{mm})^2$$

$$= 706,5\text{mm}^2$$

$$= 7,065 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

- Tensão normal

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{20000}{7,065 \times 10^{-4}} = 28,3 \text{ MPa}$$

Deformação

Quando uma força (esforço) é aplicada em um corpo, ocorre uma variação nas dimensões deste, o que chamamos de deformação. A deformação é proporcional à aplicação da força. Ela pode ser *elástica* ou *plástica*.

A deformação elástica se caracteriza pelo fato de que, cessada a aplicação da força, o corpo volta à sua dimensão original. Veja a **Figura 3.5**.

Já a deformação plástica é permanente, ou seja, cessada a aplicação da força, o material permanece deformado. Veja, também, a **Figura 3.5**. Podemos observar que, após a deformação plástica, cessada a força, o material não volta à sua forma original, mas há uma “recuperação da forma”, ou seja, uma recuperação da deformação referente ao comportamento elástico.

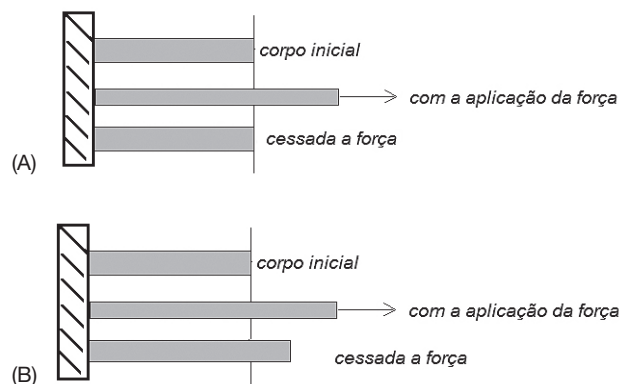
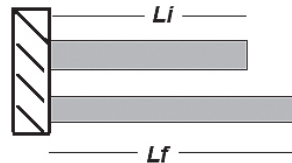


Figura 3.5: Representação dos tipos de deformação: a) elástica; b) plástica.

A deformação, designada pela letra grega ε (lê-se épsilon), é a relação entre o alongamento e o comprimento inicial. É uma *grandeza adimensional* e, neste caso, se multiplicada por 100, representa uma percentagem.



$$\varepsilon = \frac{\Delta L(\text{alongamento})}{L_i(\text{comprimento inicial})}$$

Sendo $\Delta L = L_f - L_i$, temos: $\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{mm}{mm}$

Exemplo: Determine a deformação de uma barra de 10 m deformada, sabendo que seu comprimento aumentou em 0,08 m.

Solução:

Sabemos que $\Delta L = 0,08$ m. Então: $\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{0,08}{10} = 0,008$



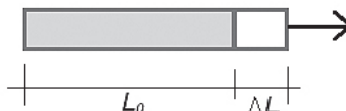
Grandeza adimensional

Toda grandeza é representada por um número e uma unidade. Por exemplo, na expressão *Faltam 10 para bater o recorde*, a falta da unidade deixa a grandeza incompleta. Afinal, seriam 10 segundos, 10 dias, 10 quilos? Não temos como saber! Mas existem grandezas adimensionais. São grandezas que são representadas apenas pelo número, sendo desprovidas de qualquer unidade que o defina.

Atividade 2

Atende ao objetivo 2

Uma barra de cobre possui uma seção quadrada de 50 mm de lado e comprimento inicial de 1,2 m. Qual o comprimento final da barra, se houve uma deformação de 5%?

Resposta comentada

Para resolver a atividade, o primeiro passo é desenhar a barra e posicionar a carga.

Aplicando a equação da deformação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$0,05 = \frac{\Delta L}{1,2}$$

$$\Delta L = 0,06m$$

Como $\Delta L = L_f - L_0$, temos $0,06 = L_f - 1,2 \rightarrow L_f = 1,26m$

Ensaio de tração

Como visto inicialmente nesta aula, os materiais se comportam de maneira diferente quando submetidos a estímulos externos. Os metais, por exemplo, são muito utilizados em componentes estruturais (pontes, viadutos, carros, navios, aviões) e estão sujeitos à aplicação de forças externas (quando um carro passa sobre uma ponte, ele exerce uma força externa à estrutura dela, ou seja, um corpo se deforma com a aplicação de uma força externa). Conhecer o comportamento de um material quando submetido a uma força é de grande importância para conhecer o comportamento dos materiais em geral. As propriedades mecânicas dos materiais são determinadas através de ensaios mecânicos:

- *Ensaio de tração*: consiste na submissão de um corpo de prova a um esforço que tende a alongá-lo ou esticá-lo até a ruptura.
- *Ensaio de dureza*: consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça, pela aplicação de pressão com uma ponta de penetração. A medida da dureza é dada em função das características da marca de impressão.
- *Ensaio de impacto*: consiste em submeter um corpo de prova entalhado, padronizado, a uma flexão provocada por impacto por um martelo pendular; este tipo de ensaio permite determinar a energia utilizada na deformação e ruptura do corpo de prova.
- *Ensaio de fadiga*: consiste no acompanhamento do comportamento mecânico de um corpo de prova submetido a uma carga dinâmica (variável), durante um grande número de ciclos (esforços cíclicos repetitivos).
- *Ensaio de fluência*: consiste na aplicação de uma carga/tensão constante em função do tempo e a temperaturas elevadas (para metais, Temperatura > 0,4 Temperatura de fusão).

Os ensaios mecânicos, em geral, são realizados em corpos de prova (CP) padronizados. É preciso lembrar que a metodologia para a realização dos ensaios e a geometria dos corpos de prova seguem normas técnicas específicas para cada ensaio.



Uma *norma técnica* (ou padrão) é um documento, normalmente produzido por um órgão oficial acreditado, que estabelece regras, diretrizes, ou características acerca de um material, produto, processo ou serviço.

No Brasil, o órgão normativo é a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Saiba mais em: <http://www.abnt.org.br>.

Em cada um desses ensaios, podemos determinar diferentes propriedades. O ensaio mais utilizado é o de tração. Nele, o corpo é submetido a esforços até que seja levado à ruptura, permitindo determinarmos a relação entre a tensão e a deformação. Através dessa relação, informações importantes sobre o comportamento do material são identificadas. Trata-se de um ensaio de baixa complexidade, então, vamos detalhá-lo nesta aula e, em outras, veremos outros tipos de ensaios.

O ensaio de tração é realizado em máquinas específicas para essa funcionalidade. A **Figura 3.6** mostra um desenho esquemático desse equipamento.

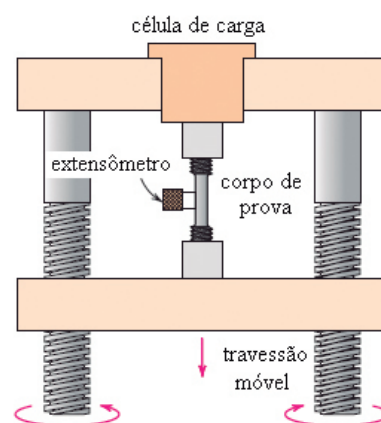


Figura 3.6: Desenho esquemático de uma máquina de ensaio de tração. (HAYDEN; MOFFAT; WULFF, 1965, p. 2).

Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ensaio_de_tra%C3%A7%C3%A3o.PNG?uselang=pt

Observe que o corpo de prova (CP) é fixado, pelas extremidades, entre duas garras: uma fixa e outra móvel. Ele é submetido a um esforço, através da aplicação de uma carga (força) gradativa. Registra-se, para cada valor de carga aplicada, o alongamento correspondente. Para medir o alongamento do CP, é afixado na parte útil do CP, um aparelho chamado extensômetro, capaz de medir deformações de corpos. O ensaio termina quando o material se rompe.

CP para ensaio de tração

Para que os resultados obtidos em ensaios mecânicos tenham relevância, é necessário que os corpos de provas tenham suas dimensões padronizadas. No caso dos ensaios de tração, os CPs seguem as normas da ABNT.

Dependendo do material de onde o CP for extraído, ele pode ter a seção transversal circular ou retangular. A **Figura 3.7** mostra a geometria de CPs para ensaios de tração.

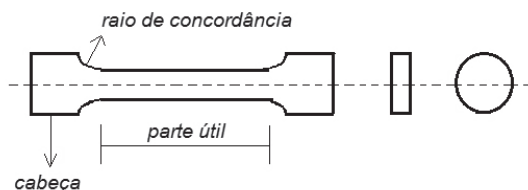


Figura 3.7: Geometria de CP para ensaio de tração. Perceba que a seção transversal do CP pode ser retangular (pontas) ou esférica (meio).

O CP é composto de uma parte útil, onde se mede efetivamente o alongamento durante o ensaio de tração, e pela cabeça, aonde a garra da máquina é presa.

Diagrama tensão x deformação

O ensaio de tração resulta em uma relação entre a força aplicada e o alongamento do CP, indo desde a força zero até aquela capaz de romper o CP. A partir desses dados, podemos obter o diagrama tensão x deformação. Antes de começar o ensaio, medimos o comprimento da parte útil do CP (L_0) e determinamos a área da seção transversal. Esses dados são importantes para:

1. determinar, para cada força aplicada, a tensão relacionada através da equação da tensão:
2. determinar a deformação associada a cada tensão:



Veja como construir um gráfico no vídeo “Gráficos de uma equação - Matemática - Ens. Fund. - Telecurso”: <https://youtu.be/DYoeJ3NupwA>. Isso lhe ajudará a resolver a próxima atividade.

Atividade 3

Atende ao objetivo 3

Um ensaio de tração foi executado em um corpo de prova com diâmetro original de 13 mm e comprimento inicial de 50 mm. Os resultados do ensaio até a ruptura estão listados na tabela ao lado. Lembrando que a área do círculo se calcula com a fórmula $A = \frac{\pi d^2}{4}$, faça o gráfico do diagrama tensão x deformação.

Carga (kN)	
0,0	0,0
53,5	0,13
75,3	1,02
0,7	2,54
97,5	7,11
88,5	10,2

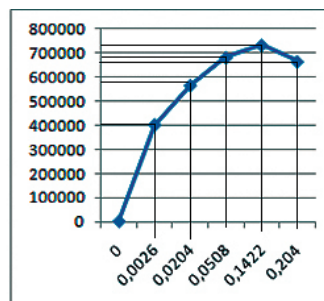
Resposta comentada

O primeiro passo para desenvolvermos o diagrama tensão x deformação é transformar carga em tensão e variação de comprimento em deformação. Determinar a área da seção transversal do CP é fundamental; como foi dado o diâmetro da seção transversal, significa que ele é circular. Então, a área da seção circular é:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (0,013)^2}{4} = 1,33 \times 10^{-4} m^2$$

Para calcular as tensões, temos que dividir cada valor de força dado no exercício pela área calculada anteriormente. Já para calcular a deformação, temos que dividir cada valor de Δl pelo comprimento inicial da barra dado no exercício, que é de 50 mm.

$\sigma = \frac{F}{A} (Pa)$	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$
0	0
402255,6	0,0026
566165,4	0,0204
681954,9	0,0508
733082,7	0,1422
665413,5	0,204



As características da curva tensão x deformação

Observe a **Figura 3.8**. Nela, temos a representação de uma curva tensão x deformação. A seguir, apresentamos uma discussão acerca das principais características da curva.

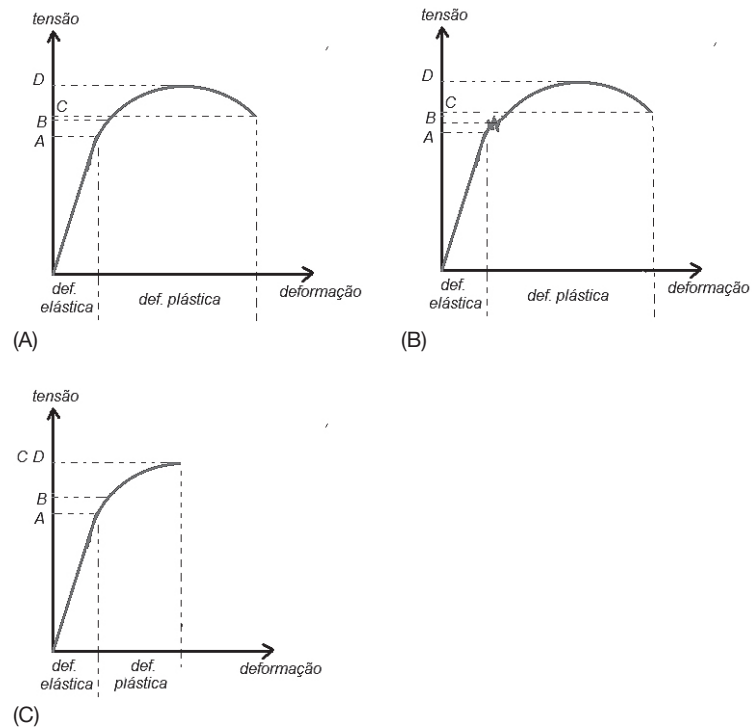


Figura 3.8: Curvas esquemáticas de tensão x deformação.

O ponto A dos gráficos representa o *limite de proporcionalidade*, isto é, indica a tensão máxima em que a deformação é puramente elástica. Na região de deformação elástica, podemos observar que a tensão é proporcional à deformação, e essa relação é estabelecida pela Lei de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

em que σ é a tensão, ε a deformação e E o módulo de elasticidade ou módulo de Young. O módulo de elasticidade é o coeficiente angular (inclinação) da curva até o ponto A. Trata-se de um valor que indica a capacidade do material de se deformar mais ou menos elasticamente. Veja, na **Tabela 3.3**, os valores do módulo de elasticidade de algumas ligas metálicas.

Tabela 3.3: Módulos de elasticidade

Material	Módulo de elasticidade (GPa)
Alumínio	69
Bronze	97
Cobre	110
Magnésio	45
Níquel	207
Aço	207
Titânio	107
Tungstênio	407

Observe o gráfico da **Figura 3.9**. A curva 1 (menos inclinada) tem um módulo de elasticidade maior do que a curva 2 (mais inclinada). Como podemos concluir isso? Devemos ter em mente que, para um mesmo valor de tensão, obedecendo à Lei de Hook, maior o valor do módulo de elasticidade e menor o valor da deformação. Então, quanto menos inclinada a curva, também menos deformação elástica sofrerá o material para uma dada tensão.

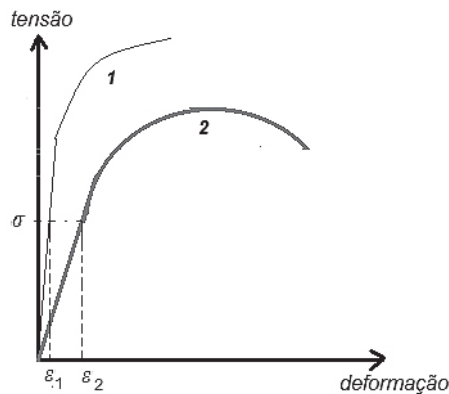


Figura 3.9: Curva tensão x deformação hipotética para materiais com módulos de elasticidade diferentes. Neste exemplo, podemos perceber que as inclinações das curvas (pontos ε_1 e ε_2), determinadas a partir de um ponto da tensão σ , são diferentes. Isso se deve ao módulo de elasticidade de cada material, que gera deformações diferentes.

Outro parâmetro importante para o estudo do comportamento dos materiais é o coeficiente de Poisson (ν). Ele mede a deformação trans-

versal (em relação à direção de aplicação da força) em materiais *isotrópicos*. Observe a **Figura 3.10**. Nela, podemos observar que, quando aplicamos uma força F na direção y , a barra alonga nessa direção. Porém, nas direções x e z , há uma compressão.



Anisotropia é a característica de uma substância, segundo a qual certa propriedade física varia de acordo com a direção na qual a característica é medida.

Isotropia é a propriedade que caracteriza as substâncias que possuem as mesmas propriedades físicas, independentemente da direção considerada.

É preciso designar qual propriedade existe em cada material: anisotropia ou isotropia. Dentre elas, há ainda subpropriedades, por exemplo:

Isotropia óptica é quando sólidos possuem o mesmo índice de refração em todas as direções.

Isotropia mecânica é quando as propriedades mecânicas são as mesmas em todas as direções.

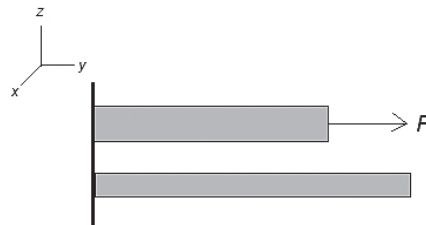


Figura 3.10: Representação da deformação.

O coeficiente de Poisson é dado pela relação entre as deformações ortogonais.

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_y}$$

em que ε_x = deformação na direção x, que é transversal à direção y;

ε_z = deformação na direção z, que é transversal à direção y;

ε_y = deformação na direção y, que é longitudinal.

O sinal negativo da fórmula é devido ao fato de as deformações transversais e longitudinais possuírem sinais opostos, ou seja, para o material poder “esticar” na direção y (direção de aplicação da força), tem que haver compressão nas direções x e z.

Exemplo:

Calcule a redução no diâmetro de uma barra de 10 cm de comprimento e 2 cm de diâmetro iniciais que teve uma deformação longitudinal igual a 0,01 e possui coeficiente de Poisson de 0,35.

Solução:

Para calcular a redução do diâmetro, precisamos saber qual foi a deformação transversal:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\varnothing}}{\varepsilon_y} \rightarrow 0,35 = -\frac{\varepsilon_{\varnothing}}{0,01}$$

$$\varepsilon_{\varnothing} = -0,035$$

Então, como $\varepsilon_{\varnothing} = \frac{\varnothing_f - \varnothing_i}{\varnothing_i}$, análogo à deformação na direção y,

$$\varepsilon_{\varnothing} = \frac{\varnothing_f - \varnothing_i}{\varnothing_i} \rightarrow -0,035 = \frac{\varnothing_f - 2}{2}$$

$$\varnothing_f = 2,07 \text{ cm}$$

Se o diâmetro inicial é de 2 cm e o final é de 1,93 cm, significa que houve uma redução de 0,07 cm.

Atividade 4

Atende ao objetivo 4

Uma barra composta de material homogêneo e isotrópico tem 300 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro. Em regime de deformação elástica, sob a ação da carga trativa de 10 kN, o seu comprimento aumenta em 200 μm e, conseqüentemente, seu diâmetro se reduz em 1,80 μm . Determine o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do material.

Resposta comentada

Como a deformação acontece em regime elástico, podemos utilizar a lei de Hooke:

$$\sigma = E \varepsilon$$

Queremos determinar o módulo de elasticidade E. Para isso, precisamos de σ e ε . Então:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi R^2} = \frac{10000N}{\pi(0,01m)^2} = 31,8 \times 10^6 \frac{N}{m^2} = 31,8 \times 10^4 Pa$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{20\mu m}{300mm} = \frac{20 \times 10^{-3} mm}{300mm} = 6,7 \times 10^{-5}$$

Voltando à Lei de Hooke:

$$31,8 \times 10^4 = E 6,7 \times 10^{-5}$$

$$E = 4,74 \times 10^9 Pa = 4,74 GPa$$



Voltando à **Figura 3.8**, o ponto B representa o *limite de escoamento* ou a *tensão de escoamento* (σ_{esc}). O escoamento caracteriza-se por um aumento considerável da deformação, com pequeno aumento da tensão. Também podemos defini-lo como o início da deformação plástica. Podemos observar, na **Figura 3.8a** e **3.8b**, que existem duas maneiras distintas de o escoamento se caracterizar na curva tensão x deformação.

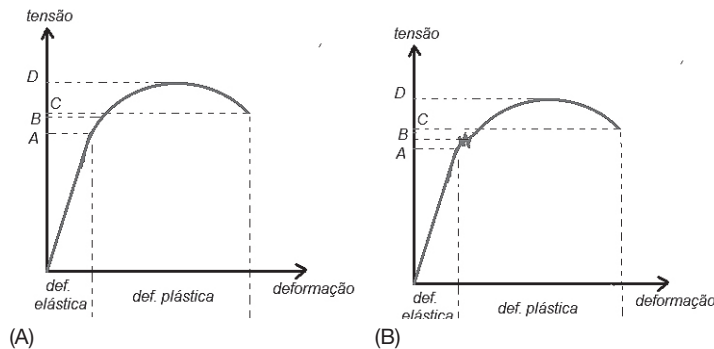


Figura 3.8: Curvas esquemáticas de tensão x deformação.

Existem materiais em que a transição entre a deformação elástica e a plástica ocorre de maneira sutil, sendo, muitas vezes, difícil identificá-la apenas olhando para o diagrama quando o escoamento se inicia, como podemos observar na **Figura 3.8a**. Já outros materiais apresentam uma descontinuidade na curva na transição entre o regime elástico e o plástico, como podemos observar na **Figura 3.8b**. Essa perturbação é conhecida como *patamar de escoamento definido*.

Na **Figura 3.8a**, para determinarmos a tensão de escoamento, utilizamos uma regra simples: observe o gráfico da **Figura 3.11**; devemos marcar no eixo da deformação a posição correspondente a 0,2% de deformação. Em seguida, traçamos uma linha paralela à curva correspondente à deformação elástica. Quando essa linha cruzar com a curva tensão x deformação, marcamos a tensão de escoamento (σ_{esc}).

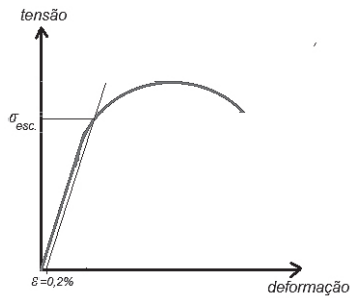


Figura 3.11: Representação esquemática da tensão de escoamento em curvas *sem patamar de escoamento definido*.

Quando o material apresenta o *patamar de escoamento*, como no caso da **Figura 3.8b**, a tensão de escoamento (σ_{esc}) é definida como sendo a tensão média do patamar. Para calcular essa tensão média, utilizamos o maior valor de tensão e o menor valor dentro do patamar, e faz-se a média. Observe a **Figura 3.12**.

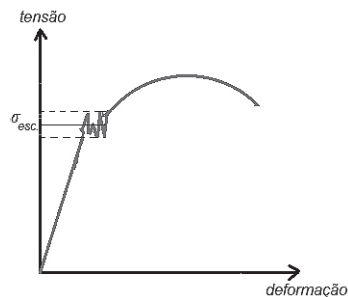


Figura 3.12: Representação esquemática da tensão de escoamento em curvas *com patamar de escoamento definida*.

Fratura

É a separação de um corpo em duas ou mais partes quando submetido a esforços mecânicos.

Ainda na Figura 3.8, o ponto C representa a *ruptura* ou *tensão de ruptura* (σ_{rup}). Trata-se da tensão na qual o material sofre **fratura**, ou seja, o ponto onde a curva termina.

O ponto D diz respeito ao *limite de resistência* ou *tensão de resistência* (σ_{max}), que é a maior tensão observada no gráfico que o material suporta antes de fraturar.

É preciso explicar os pontos C e D juntos. Observe que, nos gráficos da **Figura 3.8a** e **3.8b**, a curva não é interrompida quando se atinge a tensão máxima. Isso significa que o material não fratura nessa tensão.

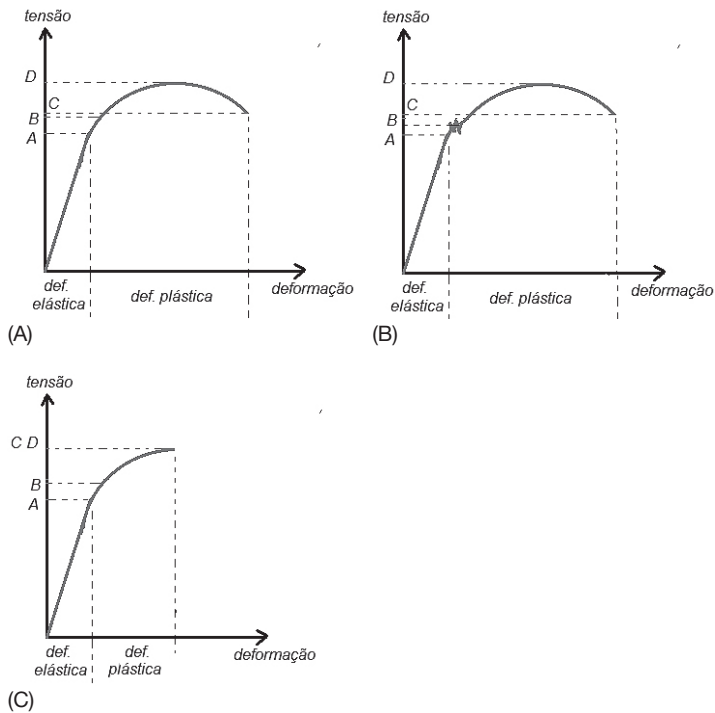


Figura 3.13: Curvas esquemáticas de tensão x deformação.

Já no gráfico da **Figura 3.13c**, a tensão de ruptura e o limite de resistência são iguais. Esse comportamento distinto acontece entre materiais **dúcteis e frágeis**.

Entre os pontos C e D, em materiais dúcteis, acontece o fenômeno da *estricção*. Trata-se de uma redução brusca da área da seção transversal (“empescoamento”) em um corpo de prova ou outra estrutura metálica sujeita a tração. Esse fenômeno acontece quando o material atinge o limite de resistência. A tensão se concentra nessa região, levando à fratura. Observe a **Figura 3.14**. Nela, temos exemplos de materiais que foram submetidos a ensaios de tração em diferentes condições.

Materiais dúcteis

Materiais que apresentam grande deformação antes da fratura, podendo ser batidos, comprimidos e/ou estirados sem se partir, ou seja, materiais maleáveis, forjáveis, estiráveis, flexíveis e elásticos. Exemplos: ouro, alumínio e cobre. Este último, por ser dúctil, é passível de ser deformado para a fabricação de fios.

Materiais frágeis

Materiais que sofrem pouca ou nenhuma deformação no processo de ensaio de tração, comportando-se de maneira oposta aos materiais dúcteis. Um exemplo de material frágil é o tijolo: ele suporta uma tensão alta, mas não se deforma antes de se romper.

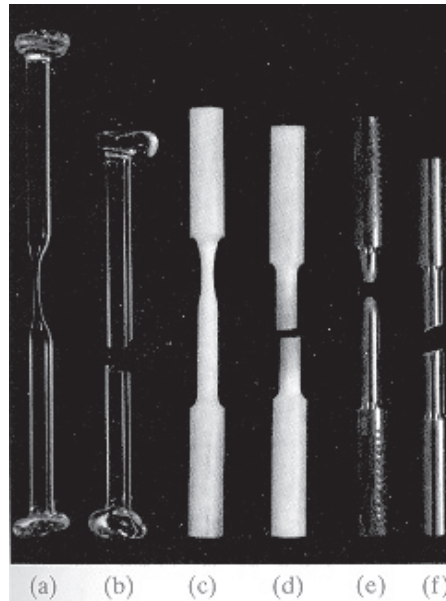


Figura 3.14: Comportamento de alguns materiais após ensaios de tração em condições diferentes. A: vidro com temperatura de aproximadamente 500 °C; B: vidro à temperatura ambiente; C: polímero tracionado lentamente; D: polímero tracionado rapidamente; E: aço à temperatura ambiente.

Fonte: <http://www.princeton.edu/~maelabs/hpt/materials/y1d-1.gif>

Exemplo: Vamos observar um diagrama tensão-deformação de um aço submetido a tração e, com base nele, julgar os itens seguintes.

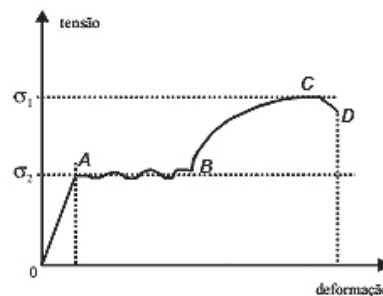


Figura 3.15: Diagrama tensão-deformação de um aço submetido a tração.

I) No trecho 0-A, têm-se tensões diretamente proporcionais às deformações.

II) O patamar de escoamento desse aço é representado pelo trecho B-C, pois, quando ocorre o escoamento, o aço sofre ganho de tensão devido à plastificação.

III) O ponto A corresponde ao limite elástico do aço.

IV) O limite de resistência do aço é dado pelo ponto D.

V) A ruptura por tração do aço ocorre no ponto C.

Solução:

I (certo): Esta é a fase elástica, e nela prevalece a Lei de Hook.

II (errado): O patamar de escoamento é representado pelo trecho A-B, pois está entre a região plástica e a elástica.

III (certo): Antes de acontecer o escoamento, a deformação é totalmente elástica.

IV (errado): O limite de resistência é a máxima tensão suportada pelo material e, neste caso, seria a σ_1 representada pelo ponto C.

V (errado): A ruptura acontece no ponto D. Como esse material é dúctil, a ruptura e a tensão máxima são pontos distintos, devido à ocorrência da estricção.

Atividade 5

Atende ao objetivo 4

O diagrama tensão-deformação indicado na **Figura 3.16** foi obtido a partir de um corpo de prova de uma liga de aço especial com alto valor do módulo de elasticidade. Com base no diagrama dado, determine:

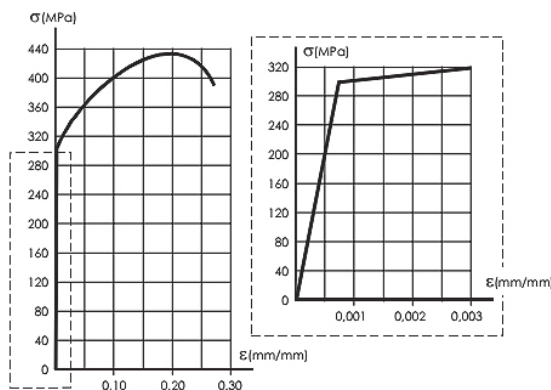


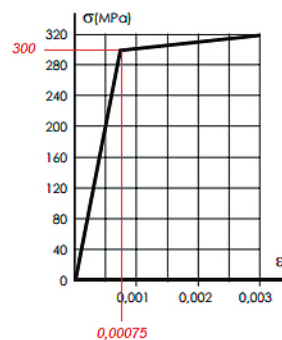
Figura 3.16

- a) o módulo de elasticidade;
- b) a tensão de escoamento;
- c) o limite de resistência e a tensão de ruptura.

Resposta comentada

a) O módulo de elasticidade é o coeficiente angular da curva correspondente à deformação elástica. Ou, se preferir, pela lei de Hooke: $\sigma = E_\epsilon \epsilon$.

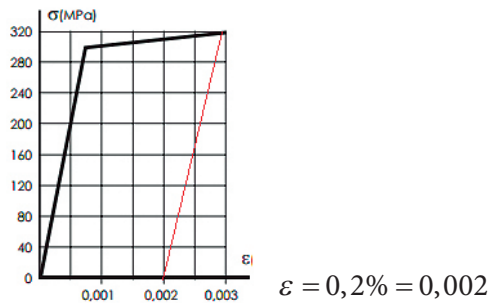
Utilizando os dados do gráfico e observando sua parte em destaque, temos:



$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} = \frac{300 \text{ MPa} - 0}{0,00075} = 400 \text{ GPa}$$

(Os valores em destaque são aproximados.)

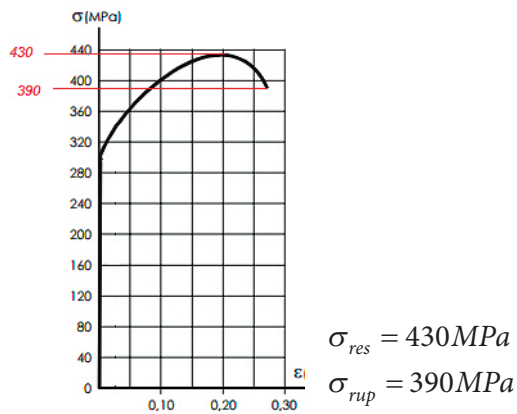
b) Para a tensão de escoamento, como esse material não apresenta patamar de escoamento definido, vamos utilizar a regra de 0,2% de deformação.



Traçando uma linha paralela à reta da deformação elástica, cruzamos a curva em uma tensão de 320 MPa.

Portanto: $\sigma_{esc} = 320 MPa$

c) O limite de resistência é a máxima tensão e a tensão de ruptura é quando o CP se rompe.



Assista a um ensaio de tração em: <https://www.youtube.com/watch?v=sKBOdB0x4gk>

===== **Atividade Final** =====

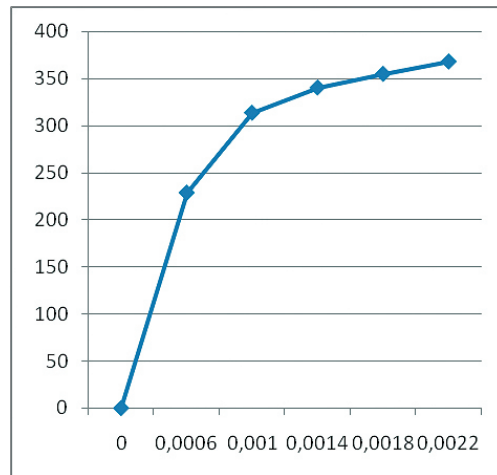
Atende aos objetivos 3, 4 e 5

Os dados de um teste tensão-deformação de uma cerâmica são fornecidos na tabela a seguir. A curva é linear entre a origem dos eixos e o primeiro ponto, sendo a origem o ponto 0,0 (zero, zero). Construa o diagrama e diga se esse material é dúctil ou frágil. Em seguida, justifique essa classificação.

Tensão (MPa)	ε
0,0	0,0
228,9	0,0006
313,7	0,0010
340,6	0,0014
355,1	0,0018
368,2	0,0022

Resposta comentada

Como os dados fornecidos são de tensão e deformação, basta construir o gráfico, a partir do qual é possível perceber que o material se rompe quando atinge a máxima tensão, o que faz dele um material frágil. Além disso, após o escoamento, ele apresenta pouca deformação, característica comum a esse tipo de material.



Conclusão

Os materiais se comportam de maneira distinta sob uma mesma solicitação externa, pois possuem, por diversas razões, propriedades físicas diferentes, que se dividem em: elétricas, térmicas, ópticas e mecânicas. As propriedades mecânicas são uma resposta dada pelo material quando uma força externa é aplicada a ele. Em engenharia, o estudo do comportamento mecânico é fundamental, porque as estruturas de interesse estão sob a ação de esforços externos.

Resumo

Vimos, nesta aula, que:

- As propriedades dos materiais se resumem em como o material se comporta quando solicitado externamente.
- As propriedades físicas dos materiais se dividem em: elétricas, térmicas, ópticas e mecânicas.
- Em solicitações mecânicas, os materiais podem sofrer esforços trativos, compressivos, cisalhantes, flexivos e de torção.
- Tensão é a distribuição de forças por unidade de área.
- Deformação é a variação da dimensão provocada por uma tensão aplicada.

- Deformação elástica é aquela em que, cessada a carga aplicada, o corpo volta às dimensões originais. Deformação plástica é a em que, cessada a carga, o corpo permanece deformado.
- Ensaio de tração é um mecanismo utilizado para obter o comportamento de um material quando submetido a esforço trativo. Através desse ensaio, obtemos a curva tensão x deformação, de grande importância no estudo do comportamento mecânico.
- A curva tensão x deformação nos fornece o módulo de elasticidade, o limite de escoamento e o limite de resistência, além de informações sobre ductilidade e fragilidade do material.

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, estudaremos os diagramas de fases, por meio dos quais é possível analisar o comportamento dos materiais quando formam uma solução.

Referências

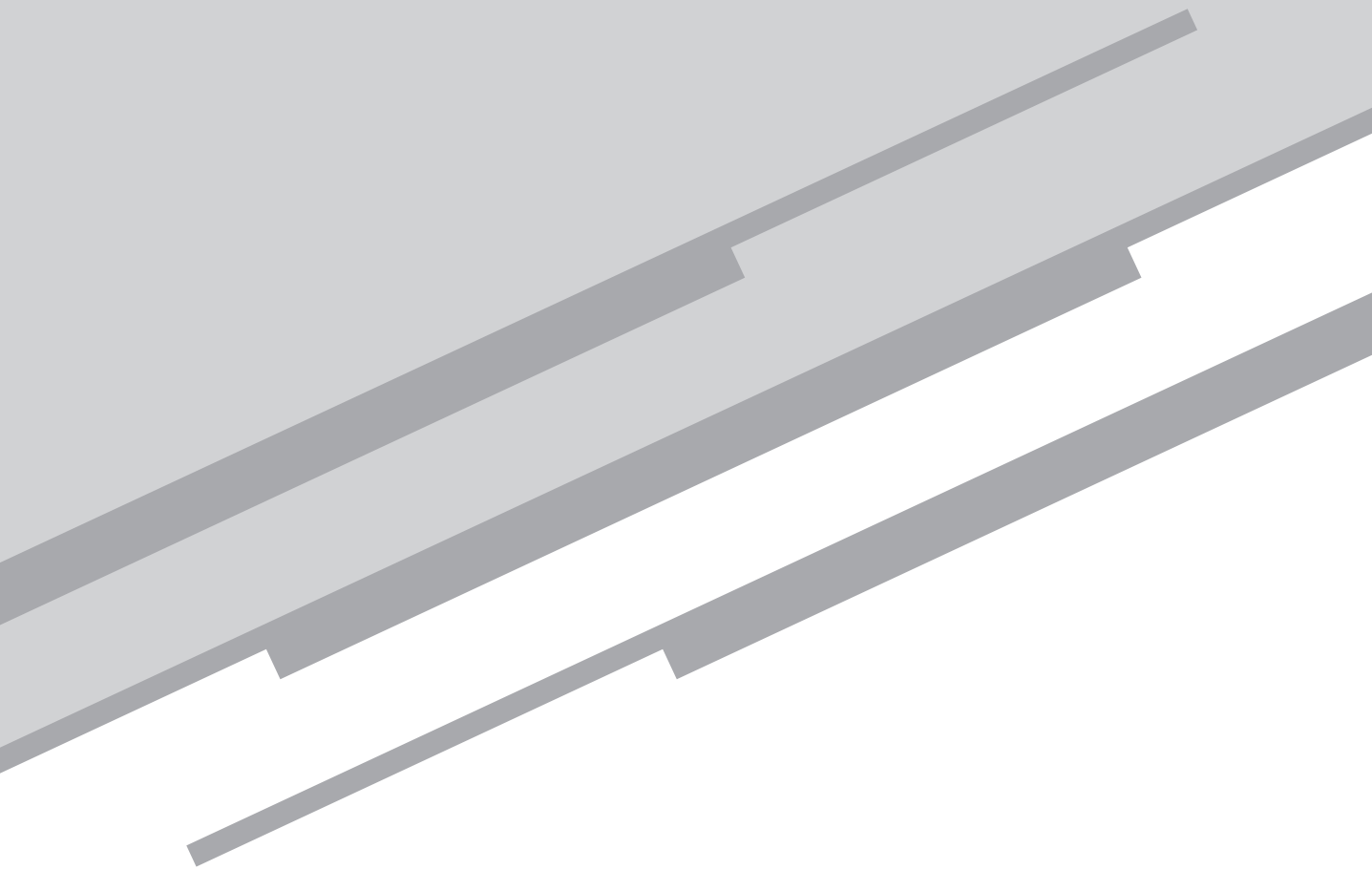
CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HAYDEN, H. W.; MOFFAT, W. G.; WULFF, J. *The Structure and Properties of Materials: Mechanics Behavior*, v. 3. New York: John Wiley & Sons, 1965.

VLACK, Laurence H. Van. *Princípio de ciência e tecnologia dos materiais*. Rio de Janeiro: Campos, 1994.

Aula 4

Diagramas de fase



Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila

Meta

Apresentar os principais conceitos relacionados a diagramas de fase por meio da interpretação de diagramas binários isomorfos e binários eutéticos.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. identificar as características de um diagrama de fase binário isomorfo;
2. identificar as características de um diagrama de fase binário eutético;
3. determinar as fases presentes, a composição das fases e a proporção das fases para uma dada liga em uma temperatura específica;
4. diferenciar as microestruturas possíveis de serem formadas em diagramas eutéticos.

Pré-requisitos

Antes de iniciar o estudo desta aula, reveja na Aula 2 os tópicos que tratam de soluções sólidas substitucionais e da formação dos contornos de grão durante o processo de solidificação.

Introdução

Você deve estar se perguntando: o que são diagramas de fases? Os diagramas de fases, também chamados de diagramas de equilíbrio de fases, relacionam temperatura, composição química e quantidade de fases em equilíbrio. Uma substância ou solução está em equilíbrio quando não existe tendência para a constituição mudar com o tempo, a menos que haja uma perturbação externa. Podemos então dizer que um diagrama resume o equilíbrio de um sistema.

Mas por que estudar diagramas de fases?

No decorrer desta aula, veremos que a microestrutura dos materiais pode ser relacionada diretamente com os diagramas de fases. Conhecer a microestrutura de um material é de grande importância no estudo dos materiais, uma vez que existe uma relação direta entre suas propriedades e suas microestruturas.

Em função da quantidade de componentes que formam os diagramas de fases, eles podem ser classificados em:

- unários (diagramas de um componente);
- binários (diagramas com dois componentes);
- ternários (diagramas com três componentes).

Observemos o diagrama mais simples, um unário: o da água pura. Veja a **Figura 4.1**.

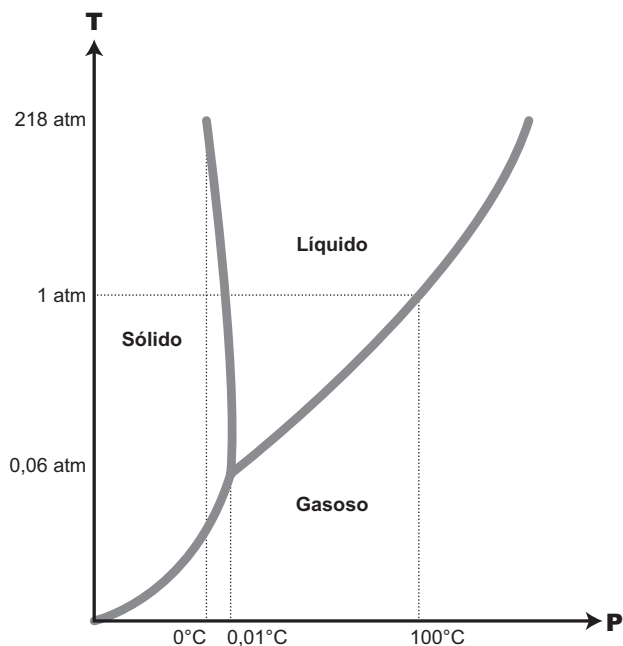


Figura 4.1: Diagrama de fase (unário) da água pura.

O diagrama da **Figura 4.1** mostra, para variações de pressão e temperatura (lembrando que a composição é fixa porque estamos falando de um diagrama unário), as fases (ou os estados) em que a água se encontra: sólida, líquida ou gasosa.

Agora vamos misturar açúcar na água! O que acontece? A princípio o açúcar se dissolve na água, mas, se continuarmos adicionando açúcar, ele atingirá um ponto em que não se dissolverá mais. Nesse caso, então temos que estudar o diagrama binário entre o açúcar e a água. Veja a **Figura 4.2**.

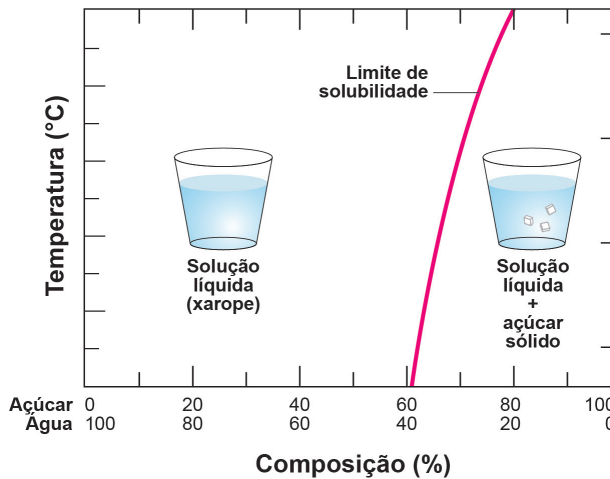


Figura 4.2: Diagrama de fases do sistema água e açúcar.

Nesse diagrama em que a pressão é fixa, podemos observar o comportamento da mistura em função da composição e da temperatura. A temperatura ambiente, com cerca de 60% de açúcar, atinge-se o limite de solubilidade do açúcar na água. No caso de concentrações maiores de açúcar, teremos a solução líquida (xarope de água com açúcar mais o açúcar que não se dissolve). A solubilidade do açúcar na água varia com a temperatura.

Esse é um exemplo simples (entre um componente líquido e um sólido) para entendermos o significado de diagramas de fase. No entanto, nesta aula, vamos estudar alguns tipos de diagramas de fase binários, formados entre componentes metálicos sólidos a temperatura ambiente.

Conceitos básicos

Para estudarmos os diagramas de fase, precisamos inicialmente compreender algumas terminologias específicas. No estudo de materiais, estamos interessados em diagramas que envolvem dois componentes. Então vamos lá!

- Componentes: elementos químicos que formam o diagrama.
- Sistema: diversas possibilidades de configurações (composição química) para um mesmo grupo de componentes.
- Solução: mistura de átomos de dois ou mais elementos. Então podemos ter soluções líquidas, gasosas e sólidas.
- Soluto e solvente: soluto é a substância que se encontra dissolvida no solvente. Solvente é a substância que dissolve o soluto.

- Limite de solubilidade: quantidade máxima de um elemento que pode ser “dissolvida” no outro. Um exemplo simples, conforme já apresentado, é a mistura de água com açúcar. Quando adicionamos um pouco de açúcar na água, os dois componentes se misturam, pois não conseguimos distinguir, nem com microscópio, o que é água e o que é açúcar. Mas, a partir de certa quantidade de açúcar, essa dissolução não mais acontece. Dizemos, então, que foi atingido o limite de solubilidade do açúcar na água. E o que teremos será uma solução de “água + açúcar” e o açúcar não dissolvido. Nessa solução, chamamos o açúcar de soluto e a água de solvente.

No caso de uma solução sólida, o limite de solubilidade refere-se à quantidade máxima de soluto intersticiais e/ou substitucionais que podem ser inseridos na rede cristalina que define a estrutura do solvente.

- Fase: Porção homogênea do material que possui propriedades físicas ou químicas uniformes. Voltando ao exemplo da solução “água + açúcar”, enquanto não se atinge o limite de solubilidade, temos uma única fase composta pela mistura homogênea de água com açúcar. Após atingir o limite de solubilidade, passamos a ter duas fases: a mistura de água com açúcar mais o açúcar não dissolvido.
- Microestrutura: **morfologia** de uma dada fase ou conjunto de fases que coexistem a uma dada composição química, temperatura e pressão.

Morfologia

Estudo da estrutura, ou seja, o estudo das formas que a matéria pode tomar.

Sistemas binários

Os sistemas binários são os sistemas formados por dois componentes. Existem diagramas simples em que temos a presença de uma ou duas fases sólidas e temos diagramas mais complexos, cujos componentes podem formar mais de duas fases. Nesta aula vamos estudar os diagramas que apresentam no máximo duas fases sólidas: os isomorfos e os eutéticos.

Miscibilidade

Capacidade de uma mistura formar uma única fase (mistura homogênea) em certos intervalos de temperatura, pressão e composição.

Diagramas isomorfos

Os diagramas binários isomorfos são formados por dois componentes que possuem completa **miscibilidade** entre si, ou seja, por componentes que não apresentam limite de solubilidade entre si. A **Figura 4.3** mostra esquematicamente as características de um diagrama isomorfo.

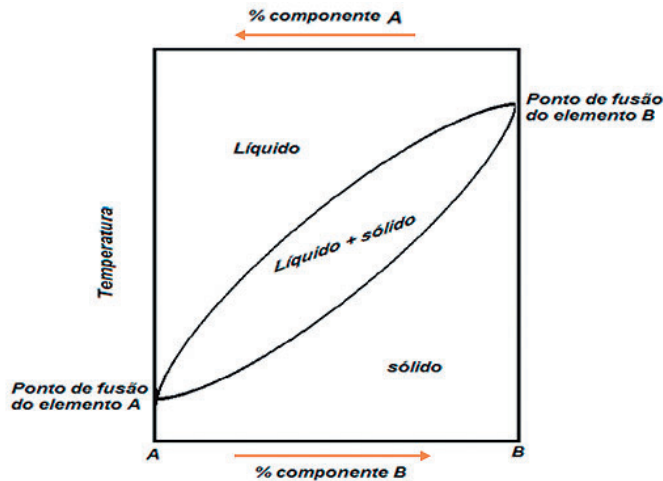


Figura 4.3: Desenho esquemático de um diagrama de fase binário isomorfo.



Caso tenha dúvidas, reveja o tópico da Aula 2 no qual tratamos de **soluções sólidas substitucionais**. Esse assunto relaciona-se com os diagramas isomorfos no que diz respeito à miscibilidade entre componentes.

O diagrama é um “mapa” que mostra a fase ou as fases para dada composição e temperatura. Então, em um eixo do diagrama, temos a composição da solução (ou liga). A e B representam os componentes. No ponto A temos 100% do componente A e 0% do componente B e, no ponto B, temos 100% do componente B e 0% de A. Isso significa que as duas linhas verticais que limitam o diagrama representam os elementos puros. Todo elemento puro possui uma única temperatura na qual passa do estado sólido para líquido quando está sendo aquecido, ou o inverso quando está sendo resfriado. Cada elemento apresenta seu ponto de fusão, que está devidamente representado no diagrama. Para as demais combinações entre A e B, o diagrama apresenta três regiões bem definidas: uma em que a solução está na fase líquida, outra em que está na fase sólida e uma em que parte da solução está sólida e outra está líqui-

da. Isso nos faz identificar que soluções (ou ligas) possuem uma faixa de temperatura na qual se solidificam (no resfriamento) ou se fundem (no aquecimento).

Interpretação dos diagramas isomorfos

Por meio dos diagramas de fases, é possível determinar, para uma dada temperatura e composição:

- quais fases estão presentes,
- a composição das fases e
- a proporção de cada fase.

- Fases presentes

Para estudarmos melhor as fases presentes, vamos interpretar um diagrama isomorfo real, formado pelos elementos cobre e níquel, conforme a **Figura 4.4**.

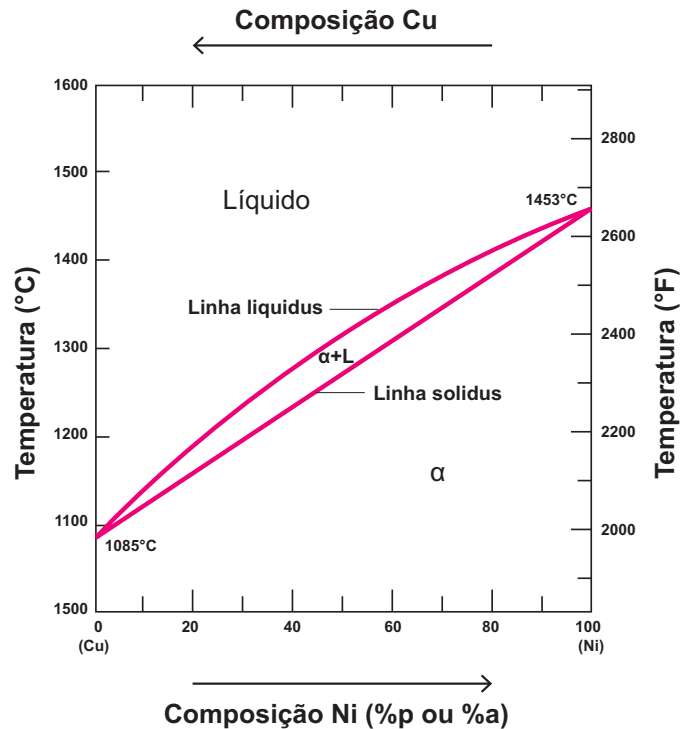


Figura 4.4: Diagrama de fase isomorfo Cu-Ni.

- O α representa a fase sólida (essa explicação vem logo a seguir).
- O p significa % em peso, e a significa % atômica.
- O Cu marca onde temos 100% de Cu .

A partir do diagrama, podemos definir que o ponto de fusão do cobre é 1085 °C, e o do níquel é 1453 °C. Todas as fases sólidas nos diagramas de fase são representadas por letras gregas; na **Figura 4.4** os sólidos estão representados por α (lê-se alfa). Para composições intermediárias, podemos observar três regiões distintas: uma região “líquido”, uma região $\alpha + L$ (ou seja, sólido mais líquido) e uma região “ α ”. A linha *liquidus* representa a temperatura acima da qual a solução está totalmente líquida. A linha *solidus* indica que, em temperaturas abaixo da linha, a solução está totalmente solidificada.

Observe a **Figura 4.5**. Vamos analisar o que acontece com uma solução ou liga que tenha 80% de Ni e, portanto, 20% de Cu.

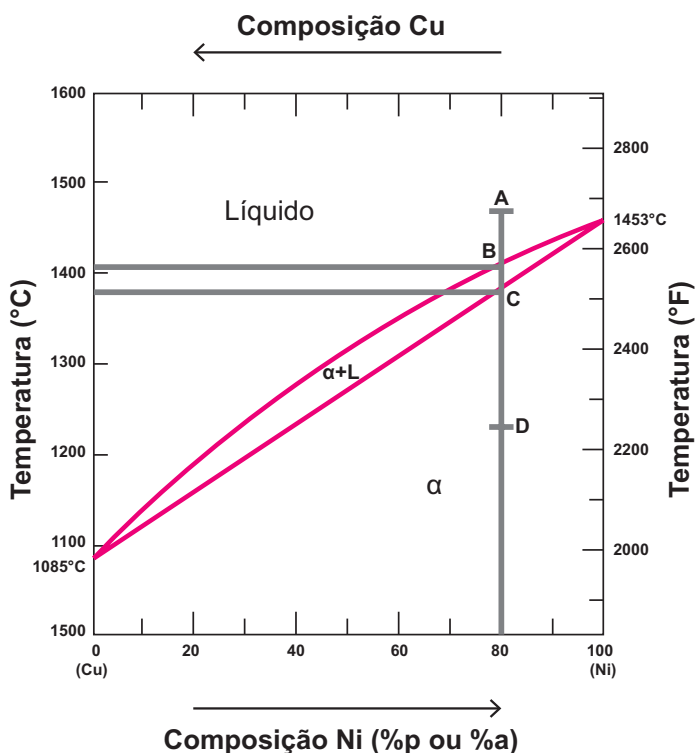


Figura 4.5: Diagrama binário isomorfo Cu-Ni destacando uma liga de composição 80% Ni 20% Cu.

No diagrama da Figura 4.5, temos uma linha vertical que representa a variação de temperatura da liga 80% Ni 20% Cu. Vamos analisar o que

acontece durante o resfriamento dessa solução. No ponto A, temos uma solução totalmente líquida, o que significa que ela está na fase líquida, pois essa temperatura está acima da linha *liquidus*. Quando a temperatura atinge o ponto B (aproximadamente 1410 °C), exatamente em cima da linha *liquidus*, começa o processo de solidificação da solução. Quando a temperatura atingir o ponto C (aproximadamente 1380 °C), exatamente em cima da linha *solidus*, a solução já está completamente solidificada, ou seja, na fase sólida. Para qualquer temperatura entre os pontos B e C, existirão em equilíbrio as fases sólida e líquida. No ponto D, a solução é totalmente sólida, apenas com uma temperatura menor do que estava no ponto C.

De acordo com o que já foi dito anteriormente, as fases sólidas são representadas nos diagramas de fase por letras gregas. No caso dos diagramas isomorfos, como existe apenas uma fase sólida, esta é representada por α .

- Composição das fases

Vamos continuar analisando uma liga 80% Ni 20% Cu. Mas agora vamos observar a **Figura 4.6(b)**. Ela representa a região do diagrama 80% Ni 20% Cu em maior escala.

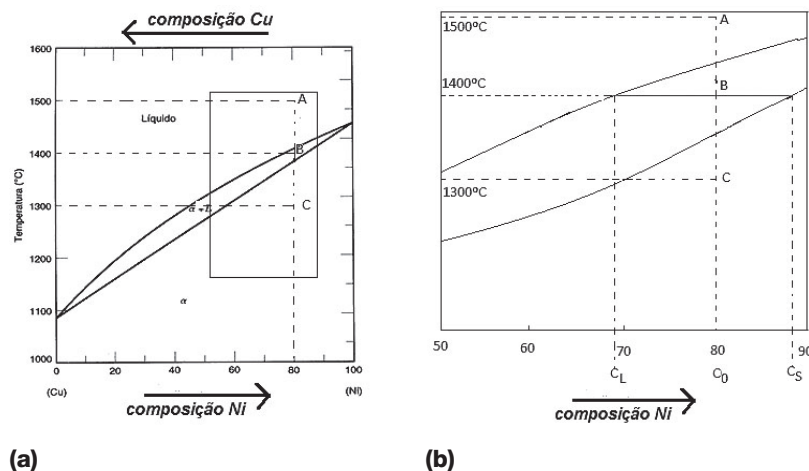


Figura 4.6: Diagrama binário isomorfo Cu-Ni. **(a)** completo; **(b)** parte em destaque da figura **a**.

Vamos determinar a composição das fases nos pontos A, B e C. Todos possuem a mesma composição, porém estão em temperaturas diferentes.

No ponto A, a solução possui apenas uma fase (líquida), portanto, essa fase possui a composição de 80% Ni 20% Cu. No ponto C, a solução possui apenas fase sólida, portanto, essa fase também possui a composição de 80% Ni 20% Cu. No ponto B, temos a presença de duas fases: sólida e líquida.

O que queremos determinar então é qual a composição da fase sólida e qual a composição da fase líquida. Para isso, traçaremos uma linha horizontal na região bifásica, passando pela temperatura em que se encontra a liga, neste caso o ponto B. Chamaremos essa linha, cujas extremidades coincidam com a linha *liquidus* e *solidus*, de **linha de amarração**. Sua intercessão com a linha *liquidus* indica-nos a composição da fase líquida (C_L), e a intercessão com a linha *solidus* indica a composição da fase sólida (C_S). Então, para o nosso exemplo da liga de 80% Ni 20%Cu, temos (valores aproximados):

Linha de amarração

Linha horizontal traçada a partir da temperatura na qual se encontra a liga para mensurar sua composição de fases.

$$\text{Fase líquida} \quad \left\{ \begin{array}{l} 69\% \text{ Ni} \\ 31\% \text{ Cu} \end{array} \right.$$

$$\text{Fase sólida} \quad \left\{ \begin{array}{l} 88\% \text{ Ni} \\ 12\% \text{ Cu} \end{array} \right.$$

Para cada temperatura entre as linhas *liquidus* e *solidus*, as fases líquida e sólida terão uma composição diferente.

- Proporção das fases

Além de determinar as fases e a composição de cada uma delas, podemos definir a proporção de cada fase. Continuaremos analisando os gráficos da **Figura 4.6** e utilizando a mesma liga de 80% Ni 20% Cu como exemplo para determinar a proporção das fases nos pontos A, B e C. Em A, temos 100% líquido, em C temos 100% sólido. E em B, qual é a porcentagem da fase sólida e a porcentagem da fase líquida? Para chegar a essa resposta, usaremos a “regra da alavanca”. A mesma linha de amarração utilizada para determinar a composição das fases é utilizada na “regra da alavanca”. Então:

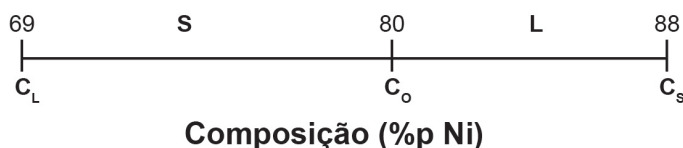


Figura 4.7: Linha de amarração para a “regra da alavanca”.

Para calcular a fração da fase líquida, utilizaremos o intervalo entre a composição da liga e a composição da outra fase, neste caso, da fase sólida.

$$W_L = \frac{C_s - C_o}{C_s - C_L}$$

$$W_s = \frac{C_o - C_L}{C_s - C_L}$$

W_s = porcentagem da fase líquida

C_s = porcentagem de cobre sólido no ponto marcado pela linha de amarração

C_o = porcentagem de cobre na composição da liga (ou seja, o total de cobre na liga)

C_L = porcentagem de cobre líquido no ponto marcado pela linha de amarração

W_s = porcentagem da fase líquida

Para o nosso exemplo, temos:

$$W_L = \frac{88-80}{88-69} = 0,42 \text{ ou } 42\% \text{ de fase líquida}$$

$$W_L = \frac{80-69}{88-69} = 0,58 \text{ ou } 58\% \text{ de fase sólida}$$

É preciso lembrar que esses valores são para quando a liga estiver a 1400 °C. Para qualquer outra temperatura dentro da região bifásica, temos que fazer outra linha de amarração e, portanto, as frações de cada fase serão diferentes.

Atividade 1

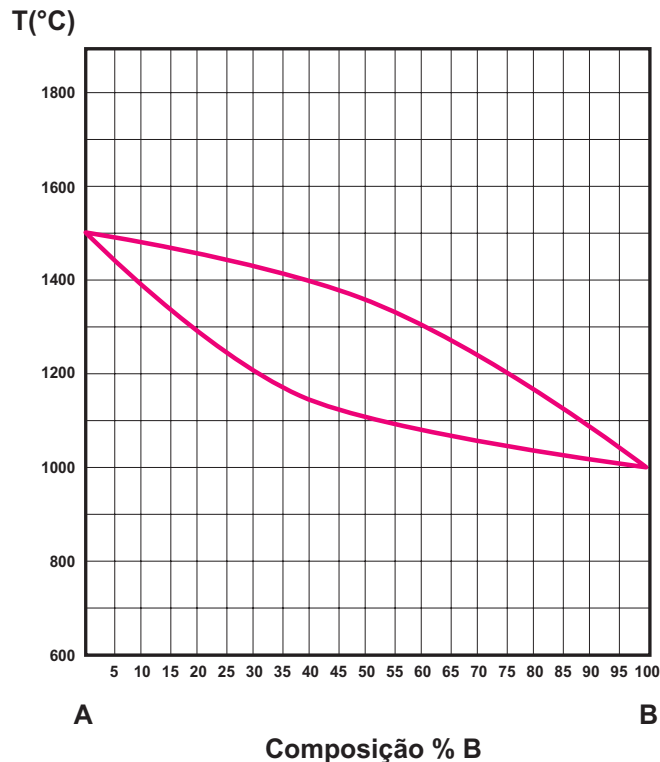
Atende aos objetivos 1 e 3

Considere o diagrama hipotético isomorfo do sistema AB.

- Identifique no diagrama os pontos de fusão dos elementos A e B, a linha *liquidus* e a linha *solidus*.
- Indique no gráfico os pontos que correspondem à composição de 20, 30, 40, 60 e 80% de B sobre a **isoterma** de 1200 °C, ou seja, na linha de amarração de 1200 °C.
- Indique, para cada ponto do item anterior, as fases e suas respectivas composições, ou seja, a quantidade de cada fase.

Isoterma

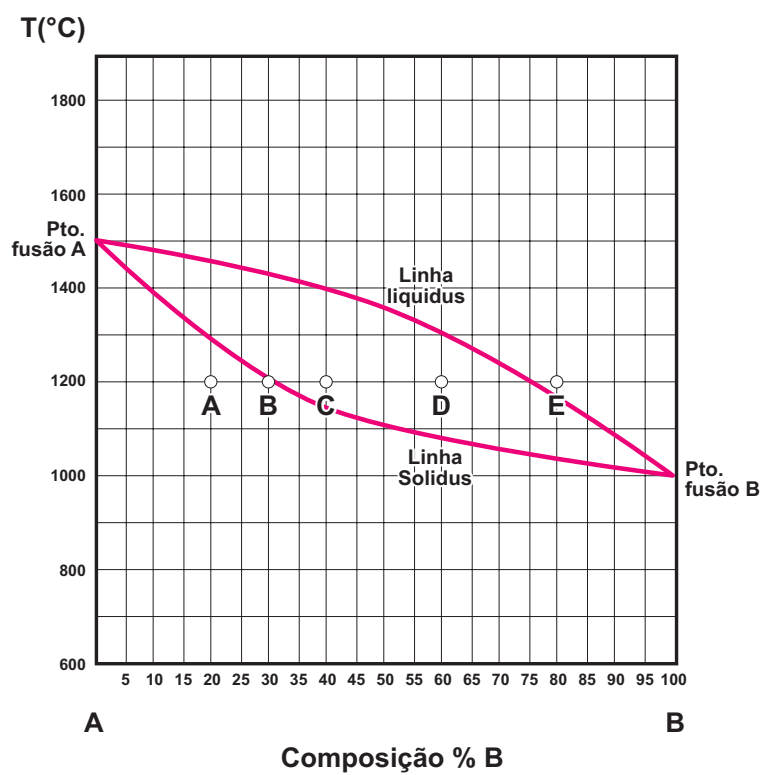
Linha sobre a qual a temperatura se mantém constante.



[illegible]

Resposta comentada

a) e b)

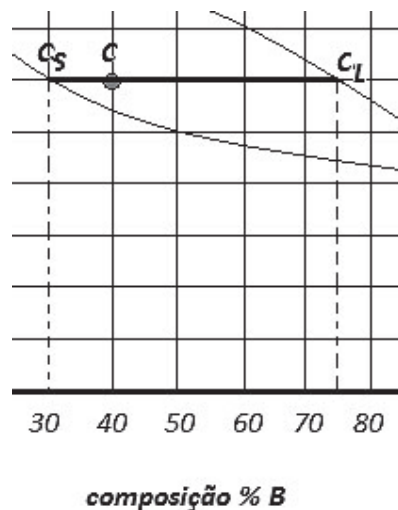


c)

Ponto A: 100% fase α (pois a liga se encontra a uma temperatura abaixo da *solidus*), com 20% B 80% A.

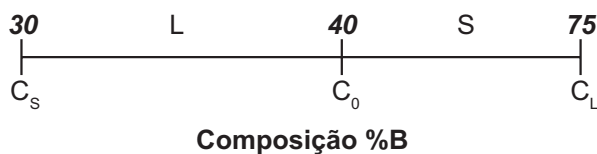
Ponto B: 100% fase α (quando se atinge a temperatura *solidus*, a solução está totalmente solidificada), com 30% B 70% A.

Ponto C: Para determinar a composição das fases, precisaremos usar a linha de amarração para calcular seus valores, já que o ponto se localiza no campo bifásico. Portanto, usaremos a regra da alavanca para determinar a proporção das fases, sendo C igual a C_0 :



Fase líquida (75% B, 25% A)

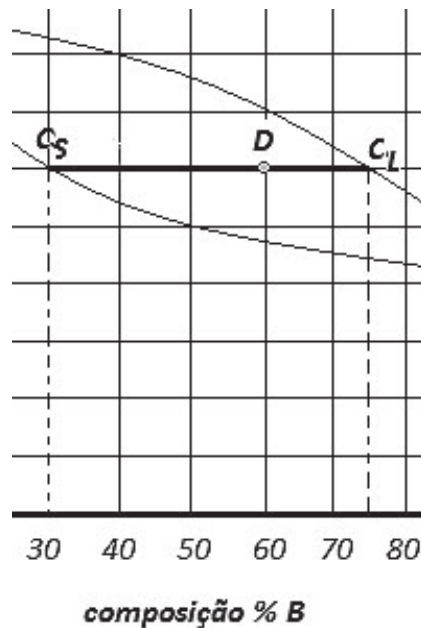
Fase sólida (30% B, 25% A)



$$\% \alpha = \frac{75 - 40}{75 - 30} = 0,78 \text{ ou } 78\% \alpha$$

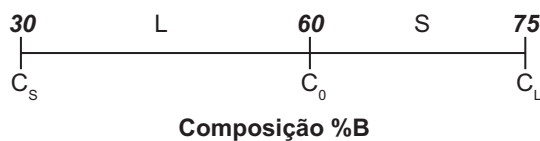
$$\% \alpha = \frac{40 - 30}{75 - 30} = 0,22 \text{ ou } 22\% \alpha$$

Ponto D: Já que esse ponto se localiza no campo bifásico, precisaremos usar a linha de amarração para determinar a composição das fases. Portanto, usaremos a regra da alavanca para calcular a proporção das fases, sendo D igual a :



Fase líquida (75% B, 25% A)

Fase sólida (30% B, 25% A)



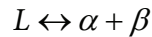
$$\% \alpha = \frac{75 - 60}{75 - 30} = 0,33 \text{ ou } 33\% \alpha$$

$$\% \alpha = \frac{60 - 30}{75 - 30} = 0,67 \text{ ou } 67\% \alpha$$

Ponto E: 100% fase líquida (pois a liga se encontra a uma temperatura acima da *liquidus*), com 80% B 20% A.

Diagramas eutéticos

Os diagramas binários eutéticos recebem esse nome devido a uma reação que ocorre chamada de reação eutética. Nessa reação, o líquido, ao resfriar, se solidifica dando origem a duas fases sólidas distintas.



em que α representa uma fase sólida, e β outra fase sólida. Esses diagramas acontecem entre componentes que não são completamente miscíveis um no outro, ou seja, quando existe limite de solubilidade do elemento A em B e do elemento B em A. Observe a **Figura 4.8**. Nela temos a representação esquemática de um diagrama eutético.

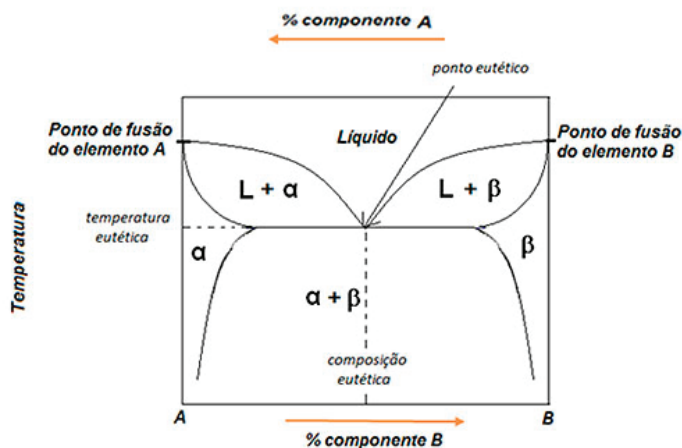


Figura 4.8: Representação esquemática de um diagrama binário eutético.

O diagrama eutético, assim como o diagrama isomorfo, é um “mapa” que mostra a fase ou as fases para dada composição em determinada temperatura. Então, em um eixo do diagrama, temos a composição da solução (ou liga). Essa composição é dada pela porcentagem dos elementos A e B, que representam os componentes. No ponto A, temos 100% do componente A e 0% do componente B e, no ponto B, temos 100% do componente B e 0% de A. Isso significa que as duas linhas verticais que limitam o diagrama representam os elementos puros. O diagrama também nos possibilita uma observação importante: todo elemento puro possui uma única temperatura na qual passa do estado sólido para líquido quando está sendo aquecido, ou o inverso quando está sendo resfriado. Já qualquer liga possui um intervalo de solidificação limitada entre as linhas *liquidus* e *solidus*.

O diagrama apresenta três regiões monofásicas: fase líquida, fase sólida α e - fase sólida β . Entre as regiões monofásicas, temos as regiões bifásicas compostas pelas fases que as limitam. A região na qual coexistem a fase sólida α e a fase líquida é limitada pelas regiões monofásicas da fase líquida e da fase α , por exemplo. Existe ainda uma temperatura na qual ocorre a reação eutética. E para essa temperatura existe uma composição eutética, dando origem ao ponto eutético. Vamos estudar mais sobre esse tipo de diagrama, usando como exemplo o diagrama do sistema cobre e prata. Veja a **Figura 4.9**.

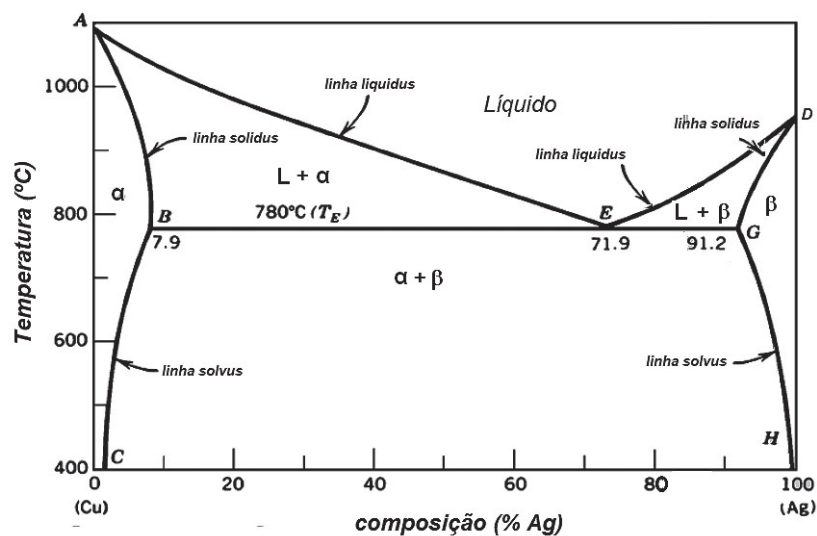


Figura 4.9: Diagrama de fase eutético do sistema Cu Ag.

A primeira observação importante é que as características do diagrama do lado direito do ponto eutético são as mesmas do lado esquerdo. Todas as características que existiam no diagrama isomorfo também existem no eutético. Vamos a elas:

- Ponto A: ponto de fusão do cobre puro (1083 °C).
- Ponto D: ponto de fusão da prata pura (960 °C).
- Linha *liquidus*: linha (temperatura) abaixo da qual começa a formação da fase sólida (solidificação). O que difere agora é que, dependendo da composição (posição da linha *liquidus*), a fase sólida formada pode ser a fase α ou a fase β .
- Linha *solidus*: linha (temperatura) abaixo da qual só existe fase sólida (o processo de solidificação está completo). Mais uma vez, a dife-

rença é que, dependendo da composição (posição da linha *solidus*), a fase sólida formada é a fase α ou a fase β .

Agora vamos listar as características próprias do diagrama eutético. A primeira diferença importante é a presença de duas fases sólidas diferentes. Já estamos falando sobre elas há algum tempo, então vamos defini-las.

- Fase α : no sistema Cu Ag, a região monofásica da fase α existe para maiores concentrações de Cu em relação a Ag. Portanto, a fase α é uma solução sólida de Ag em Cu. Isso significa que a Ag “invade” o reticulado cristalino do Cu ocupando espaços intersticiais ou substitucionais.
- Fase β : no sistema Cu Ag, a região monofásica da fase β existe para maiores concentrações de Ag em relação a Cu. Portanto, a fase β é uma solução sólida de Cu em Ag. Isso significa que o Cu “invade” o reticulado cristalino da Ag ocupando espaços intersticiais ou substitucionais.
- Temperatura eutética: temperatura na qual acontece a reação eutética para uma faixa de composição. No exemplo estudado, a temperatura eutética é de 780 °C para uma faixa de composição compreendida de 7,9% de Ag até 91,2% de Ag.
- Composição eutética: composição específica na qual ocorre a reação eutética sem a presença de um campo bifásico. No exemplo, a composição eutética é de 71,9% Ag. No tópico sobre desenvolvimento da microestrutura, esse ponto ficará mais claro.
- Linha *solvus*: linha que indica, para cada temperatura, qual a máxima solubilidade de um elemento no outro. A linha *solvus*, que se encontra na posição onde a concentração de Cu é maior que de Ag, indica a máxima solubilidade de Ag em Cu. E a linha *solvus*, que se encontra na posição onde a concentração de Ag é maior que a de Cu, indica a máxima solubilidade de Cu em Ag.

Interpretação dos diagramas eutéticos

Por meio dos diagramas de fases, é possível determinar, para uma dada temperatura e composição:

- quais fases estão presentes,
- a composição das fases,

- a proporção de cada fase e
- a microestrutura formada.

- Fases presentes

Vamos continuar utilizando o diagrama eutético Cu Ag. Observe a **Figura 4.10**.

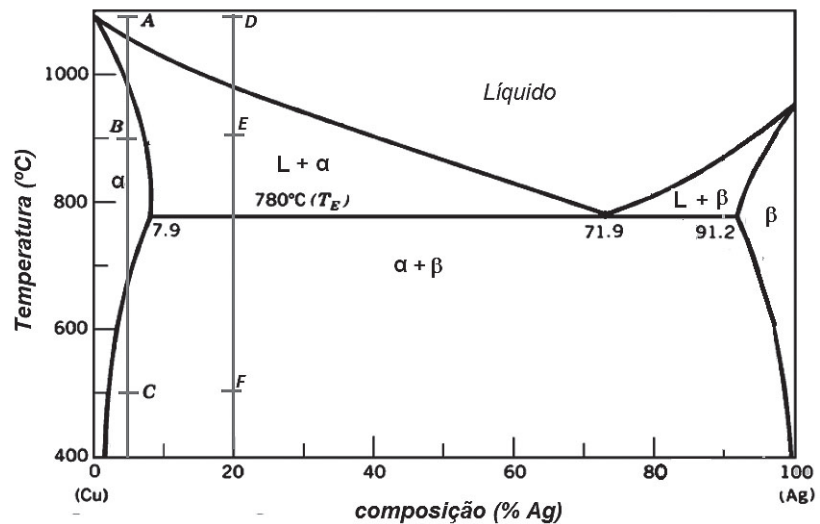


Figura 4.10: Diagrama de fase eutético do sistema Cu Ag destacando duas composições.

Vamos identificar as fases presentes para um liga com 5% de Ag e, portanto, 95% de Cu passando pelo processo de resfriamento:

- Ponto A (aproximadamente 1100 °C): há apenas fase líquida;
- Ponto B (aproximadamente 900 °C): há apenas fase sólida α ;
- Ponto C (aproximadamente 500 °C): temos uma microestrutura com duas fases sólidas presentes: α e β .

Agora vamos fazer o mesmo para uma liga com 20% de Ag e 80% de Cu:

- Ponto D (aproximadamente 1100 °C): há apenas fase líquida;
- Ponto E (aproximadamente 900°C): temos fases líquida e sólida α ;
- Ponto F (aproximadamente 500°C): temos uma microestrutura com duas fases sólidas presentes: α e β .

- Composição das fases

Ao estudarmos os diagramas isomorfos, vimos que, quando a liga em uma determinada temperatura possui uma única fase, essa possui a composição da liga. Isso significa, por exemplo, que uma liga 5% Ag 95% Cu que está a uma temperatura de aproximadamente 1100 °C (ponto A da **Figura 4.10**) possui apenas a fase líquida, e essa fase tem 5% Ag 95% Cu.

Agora, quando temos, para uma dada temperatura, um material bifásico, temos que utilizar a linha de amarração para determinar a composição de cada fase. Vamos interpretar o ponto C da **Figura 4.10**. A linha de amarração que passa por esse ponto está evidenciada na **Figura 4.11**.

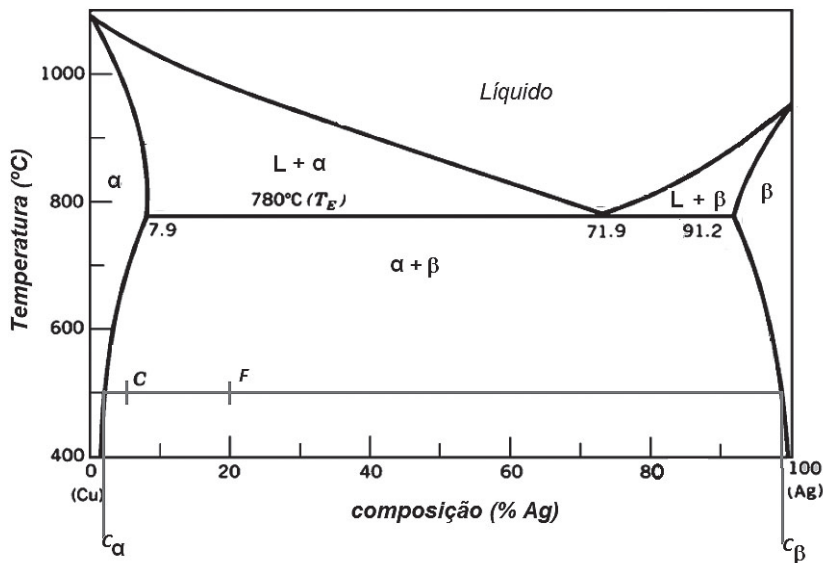


Figura 4.11: Diagrama binário eutético do sistema Cu Ag destacando a composição das fases α e β em temperatura específica.

A interseção da linha de amarração com a linha *solvus* da esquerda indica a composição da fase sólida α (C_α), e a interseção com a linha *solvus* da direita indica a composição da fase sólida β (C_β). Então para o nosso exemplo da liga com 5% Ag 95% Cu, a 500 °C, temos (valores aproximados):

$$\text{Fase sólida } \alpha \quad \left\{ \begin{array}{l} 2\% \text{ Ag} \\ 98\% \text{ Cu} \end{array} \right.$$

$$\text{Fase sólida } \beta \quad \left\{ \begin{array}{l} 98\% \text{ Ag} \\ 2\% \text{ Cu} \end{array} \right.$$

O ponto F e todos os outros pontos que compõem a mesma linha de amarração do ponto C terão a mesma composição das fases para uma liga com 20% Ag 80% Cu, a uma temperatura de aproximadamente 500 °C. Isso significa que no ponto F também temos:

$$\text{Fase sólida } \alpha \quad \left\{ \begin{array}{l} 2\% \text{ Ag} \\ 98\% \text{ Cu} \end{array} \right.$$

$$\text{Fase sólida } \beta \quad \left\{ \begin{array}{l} 98\% \text{ Ag} \\ 2\% \text{ Cu} \end{array} \right.$$

Desenvolvimento da microestrutura

A microestrutura é a morfologia de uma dada fase ou conjunto de fases que coexistem a uma dada composição química, temperatura e pressão. No caso do estudo dos materiais, o que interessa é a morfologia a temperatura ambiente. Essa microestrutura final é desenvolvida no resfriamento, a partir da fase líquida. A microestrutura depende fortemente da composição da liga (ou solução).

Vamos estudar três exemplos que englobam todas as possibilidades morfológicas para ligas eutéticas. Observe a **Figura 4.12**. Vamos analisar o desenvolvimento da microestrutura para as ligas 1, 2 e 3 representadas nos gráfico.

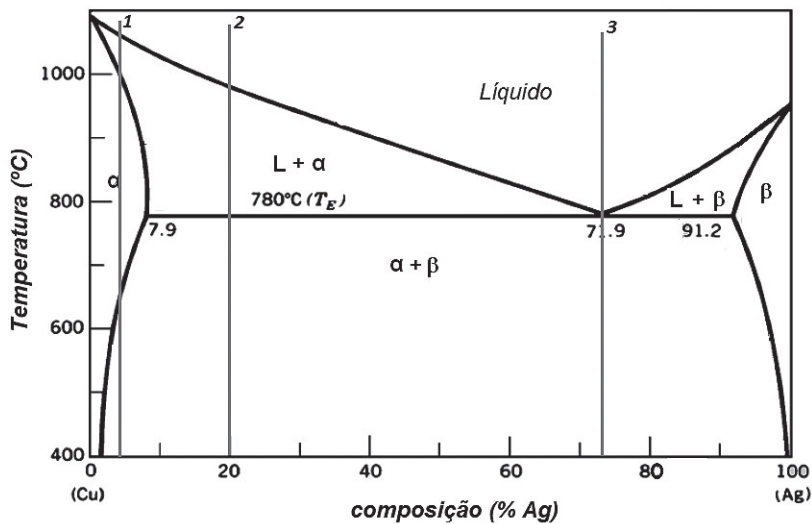


Figura 4.12: Diagrama binário eutético do sistema Cu Ag destacando três composições para desenvolvimento da microestrutura.



Reveja o tópico da Aula 2 no qual tratamos de **formação dos contornos de grão durante o processo de solidificação**. Esse tópico ajudará você a compreender melhor as próximas explicações.

Vamos começar pela microestrutura da liga 1.

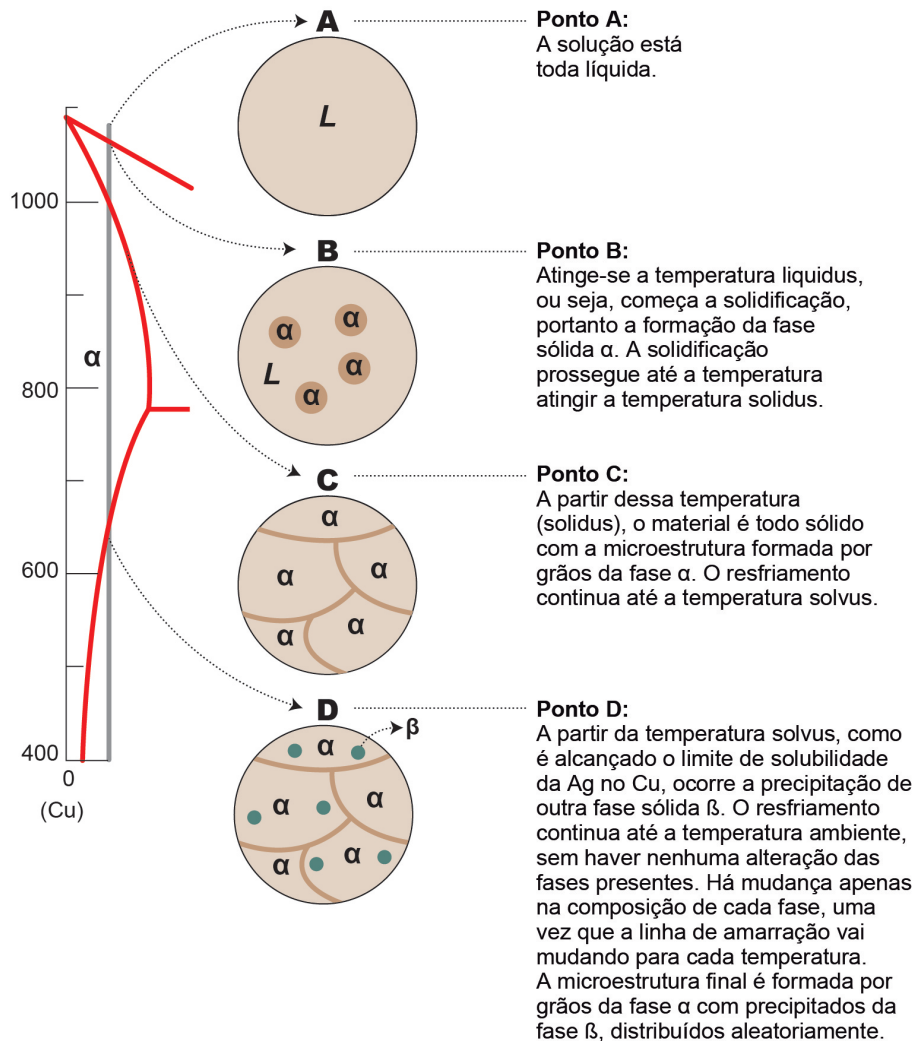


Figura 4.13: Desenvolvimento da microestrutura para liga 5% Ag 95% Cu.

Essa microestrutura ocorrerá para todas as ligas de composições entre zero e 7,9% Ag. Podemos concluir também que, para composições entre 91,2 e 100% de Ag, a microestrutura se desenvolve da mesma forma. Podemos chegar a essa conclusão porque as características do diagrama eutético à direita do ponto eutético são as mesmas do lado esquerdo do diagrama. No entanto, ao atingir a temperatura *solidus*, teremos a formação da fase β , e, ao atingir a temperatura solvus, haverá a precipitação da fase α . Portanto, temos entre 91,2 e 100% uma microestrutura final de grãos de fase β com precipitados de fase α .

Antes de desenvolvermos a microestrutura da liga 2, vamos desenvolver a liga 3 que é exatamente a liga eutética (composição do ponto eutético). A reação eutética ($L \leftrightarrow \alpha + \beta$) gera um grão com uma morfologia particular: na forma lamelar alternada das fases α e β , conforme podemos observar na **Figura 4.14**.

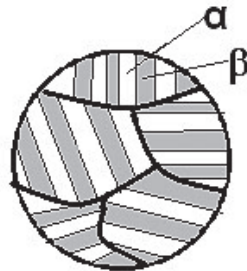


Figura 4.14: Morfologia lamelar do grão formado a partir da reação eutética.

Vamos então à microestrutura da liga eutética.

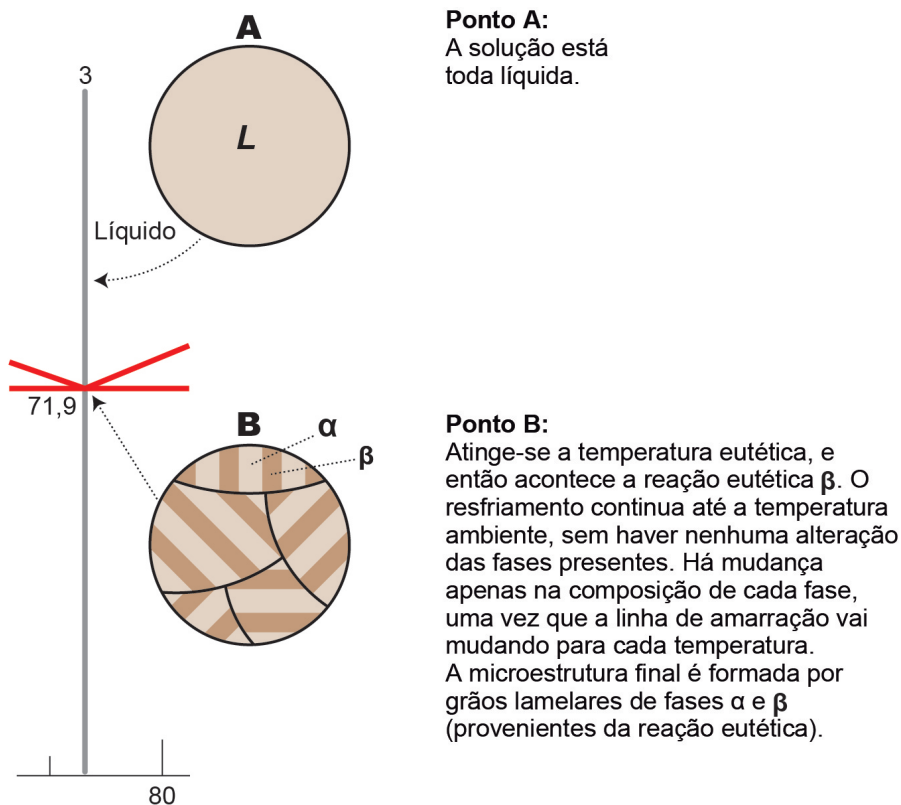


Figura 4.15: Desenvolvimento da microestrutura para liga 71,9% Ag 28,1% Cu (eutética).

Vamos, por fim, desenvolver a microestrutura da liga 2.

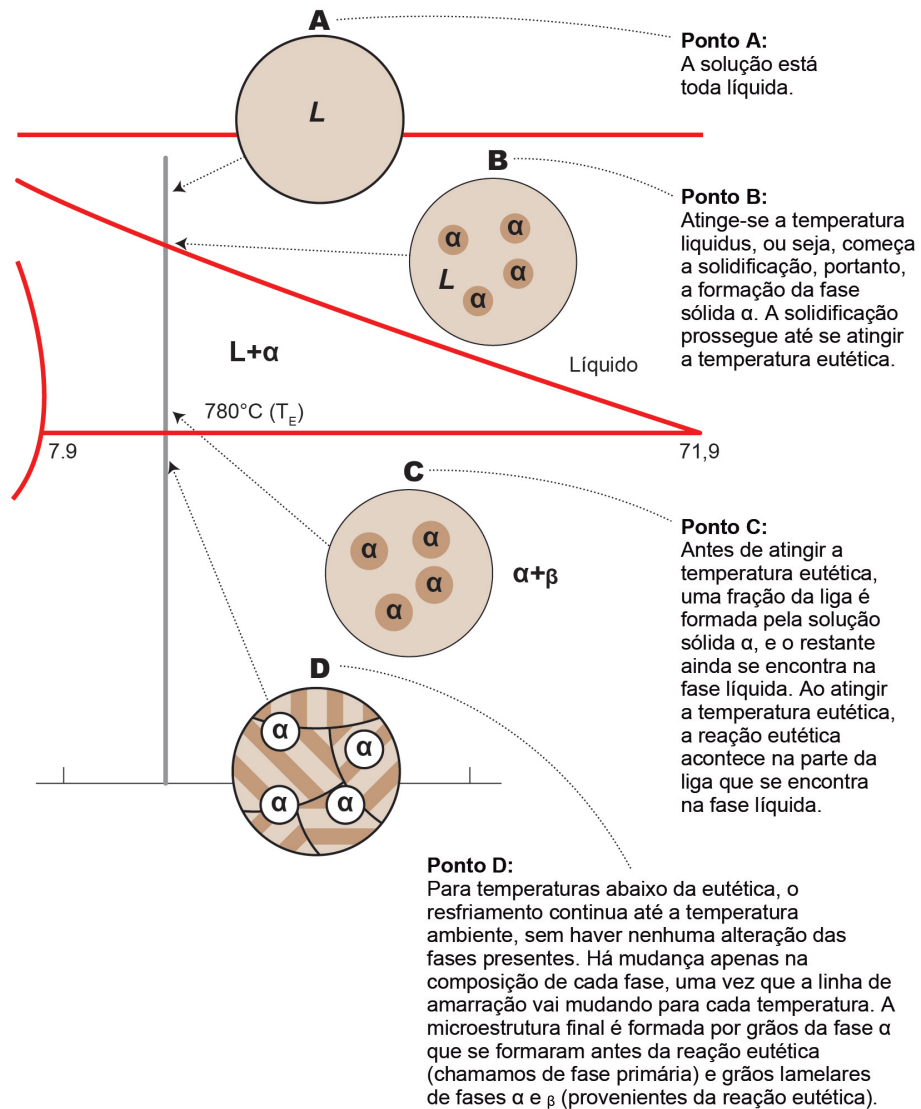


Figura 4.16: Desenvolvimento da microestrutura para liga 20% Ag 80% Cu.

A microestrutura da liga 3 ocorrerá para todas as ligas de composições entre 7,9% Ag e 71,9% Ag (ponto eutético). Podemos concluir também que, para composições entre 71,9 e 91,2% de Ag, a microestrutura se desenvolve da mesma forma. No entanto, ao atingir a temperatura *liquidus*, haverá a formação da fase β primária, e, ao atingir a temperatura eutética, haverá a formação de grãos lamelares de fases α e β .

As ligas de composição entre 7,9% Ag e 71,9% Ag (composições à esquerda do ponto eutético) são chamadas de hipoeutéticas, e as de

composição entre 71,9 e 91,2% de Ag (composições à direita do ponto eutético) são chamadas de hipereutéticas.

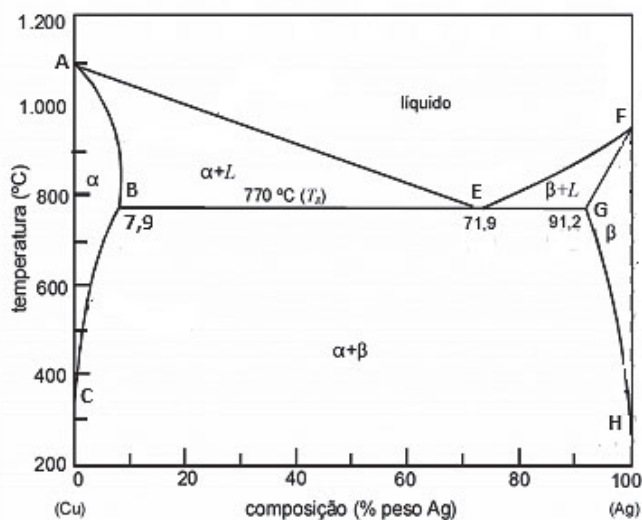
- Proporção das fases

Assim como fizemos nos diagramas isomorfos, além de identificar as fases e a composição de cada fase, podemos determinar qual a proporção de cada fase. A técnica empregada é a mesma: a regra da alavanca.

Atividade 2

Atende ao objetivo 2

Em relação ao diagrama cobre-prata mostrado anteriormente, assinale a opção CORRETA.



- Na composição 71,9% em peso de prata, o ponto eutético ocorre a 779 °C e é caracterizado pela transformação, no resfriamento, de uma fase líquida em duas fases sólidas.
- A curva CBA estabelece o limite de solubilidade da solução sólida rica em cobre.
- A linha BEG também pode ser considerada uma curva *liquidus* e representa a temperatura mais baixa em que o líquido pode existir

para quaisquer das composições.

- d) Uma regra geral para construção de diagramas binários estabelece que as regiões monofásicas estejam sempre separadas umas das outras por outra região bifásica.

Resposta comentada

A afirmativa (a) está errada, porque a temperatura mencionada é 9 °C mais alta que a temperatura correta. Ao observar o diagrama, podemos notar que a temperatura eutética é de 770 °C.

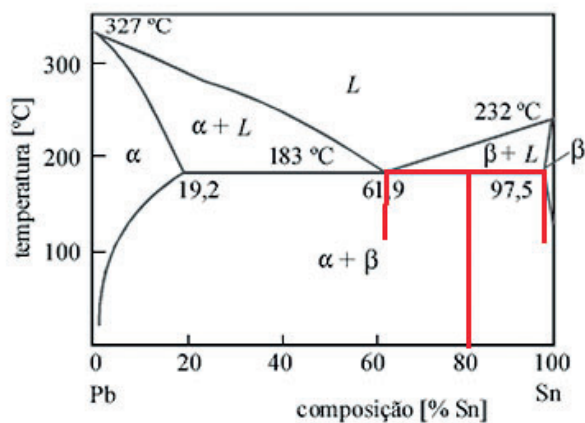
A alternativa (b) está errada, pois apenas a curva BC estabelece o limite de solubilidade da solução sólida rica em cobre. A linha AB é a linha *solidus*.

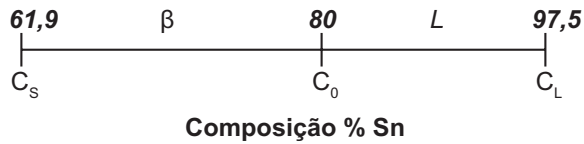
A afirmativa (c) está errada. A linha BEG é a linha eutética, temperatura na qual ocorre a reação eutética.

A alternativa (d) é a certa;

Exemplo: Calcular a proporção de fase β primária imediatamente antes da reação eutética de uma liga 80% estanho e 20% chumbo.

Para calcular a fase β primária, precisamos traçar uma linha de amarração sobre a linha eutética e aplicar a regra da alavanca.



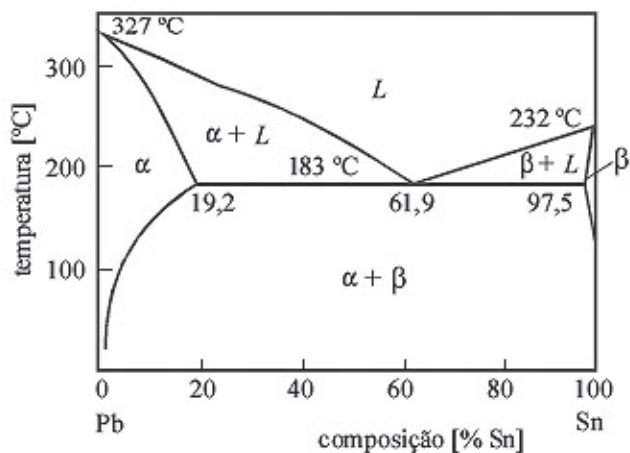


$$\% \beta = \frac{80 - 61,9}{97,5 - 61,9} = 0,51 \text{ ou } 51\% \alpha$$

Atividade final

Atende aos objetivos 2, 3 e 4

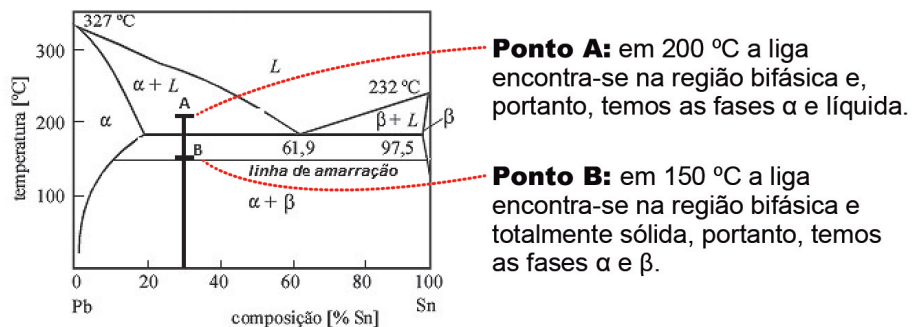
Uma liga contendo aproximadamente 30% de Sn e 70% de Pb é aquecida nas temperaturas 150 °C e 200 °C.



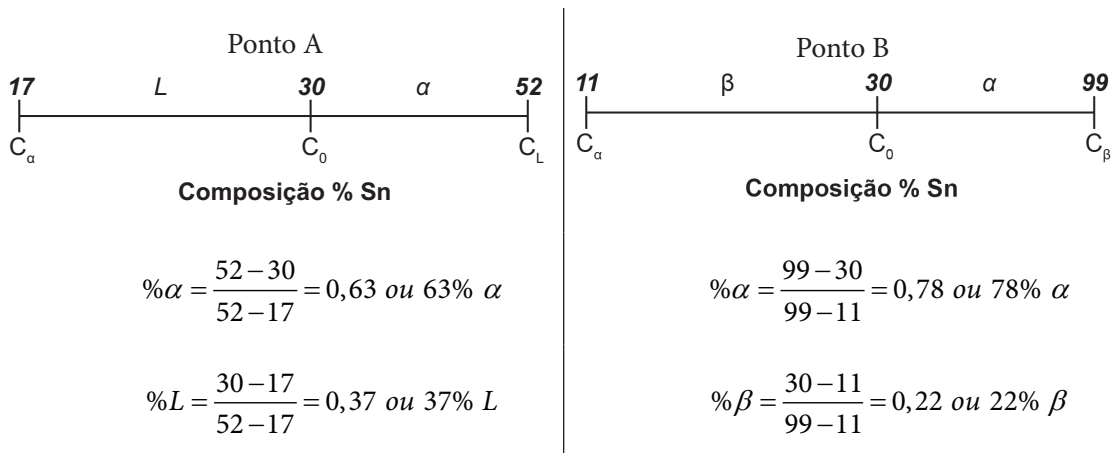
- Determine as fases presentes e suas proporções para cada temperatura.
- Determine a proporção da fase primária a uma temperatura logo abaixo da temperatura eutética.
- Desenhe a microestrutura final (após total resfriamento) dessa liga.

Resposta comentada

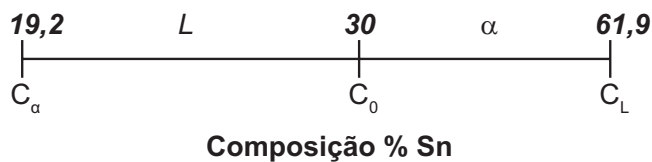
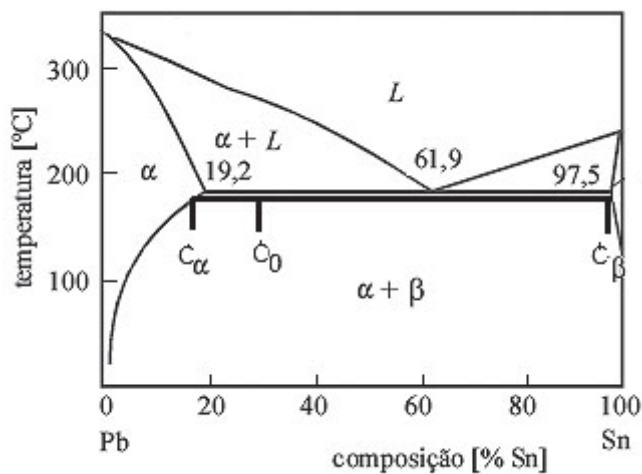
a) Para determinar as fases presentes, basta identificar em que temperatura a liga está e verificar em que região do diagrama essa localização se encontra.



Para determinar a proporção das fases, vamos utilizar a regra da alavanca em cada um dos pontos. Para isso, é necessário traçar a linha de amarração passando pelo ponto B. A composição C_α e C_β é lida nas extremidades da linha de amarração quando esta intercepta o limite entre o campo bifásico $\alpha + \beta$ e os campos monofásico α e β respectivamente.



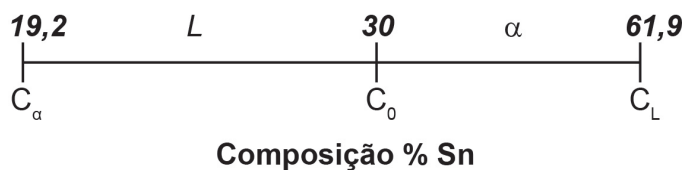
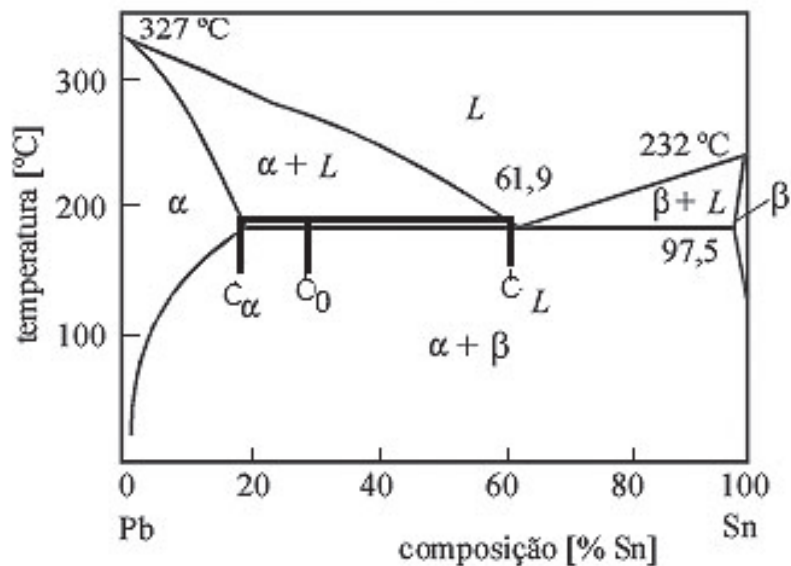
b) Sabemos que, nessa composição, a liga pode ser considerada hipoeutética e, portanto, ela apresenta uma fase primária, ou seja, uma fase sólida que se forma antes de a reação eutética acontecer (nesse caso, a fase α). Se fizermos uma regra da alavanca imediatamente após a temperatura eutética, vamos determinar a proporção de fases α e β .



$$\% \alpha = \frac{97,5 - 30}{97,5 - 19,2} = 0,86 \text{ ou } 86\% \alpha$$

$$\% \beta = \frac{30 - 19,2}{97,5 - 19,2} = 0,14 \text{ ou } 14\% \beta$$

Esse resultado mostra que temos 86% de fase α , mas não podemos distinguir o quanto dessa fase é primária, ou seja, se formou antes da reação eutética e o quanto é proveniente da reação eutética e, portanto, formadora das lamelas alternadas com a fase β . Para sabermos o quanto dessa fase α é primária, vamos fazer uma regra da alavanca imediatamente antes da temperatura eutética. Assim determinaremos a proporção da fase α e da de líquido que tínhamos antes da reação eutética. Apenas a proporção de líquido sofre a reação eutética.



$$\% \alpha = \frac{97,5 - 30}{97,5 - 19,2} = 0,86 \text{ ou } 86\% \alpha$$

$$\% \beta = \frac{30 - 19,2}{97,5 - 19,2} = 0,14 \text{ ou } 14\% \beta$$

Então podemos concluir:

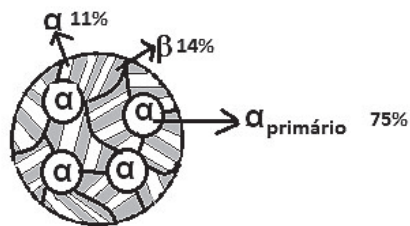
- Como tínhamos 25% de líquido antes da reação eutética, teremos 25% da microestrutura final formada pelas fases α e β lamelares.

- Como não havia fase β antes da reação eutética, toda a fração de β calculada corresponde ao eutético.
- Temos um total de 86% de fase α , desses 75% correspondem à fase $\alpha_{\text{primária}}$. Portanto, a fase α formada durante a reação eutética corresponde a 11% do total.

$$\alpha_{\text{primário}} + (\alpha + \beta)_{\text{eutético}}$$

$$75 + \underbrace{(14 + 11)}_{25}$$

c) A microestrutura final será:



Conclusão

Os diagramas de fase são parte importante no estudo dos materiais porque, por meio deles, podemos prever a microestrutura a ser formada e, portanto, correlacionar com as propriedades do material.

Resumo

Após o término desta aula, podemos concluir que:

- Os diagramas de fase são mapas que relacionam temperatura, composição química e quantidade de fases em equilíbrio.
- Existem terminologias essenciais para o estudo de diagramas de fases: componentes, sistemas, solução, soluto, solvente, limite de solubilidade, fase e microestrutura.
- Sistemas binários são formados por dois componentes. Entre os sistemas binários estudados nesta aula, temos o isomorfo e o eutético.

- Os diagramas de fases permitem-nos identificar, para uma dada temperatura, as fases presentes e a composição das fases, bem como calcular as proporções das fases utilizando a regra da alavanca.
- Sistemas isomorfos são formados por componentes que apresentam completa miscibilidade (solubilidade). Por não haver limite de solubilidade entre as fases, os elementos que constituem esse diagrama formam apenas uma fase sólida.
- Sistemas eutéticos caracterizam-se por apresentarem uma reação eutética ($L \leftrightarrow \alpha + \beta$) que acontece em temperatura específica para cada sistema. Além disso, os componentes não são completamente miscíveis e, portanto, temos a formação de duas fases sólidas distintas: α e β .

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, estudaremos em detalhes o diagrama de fase do sistema ferro-carbono.

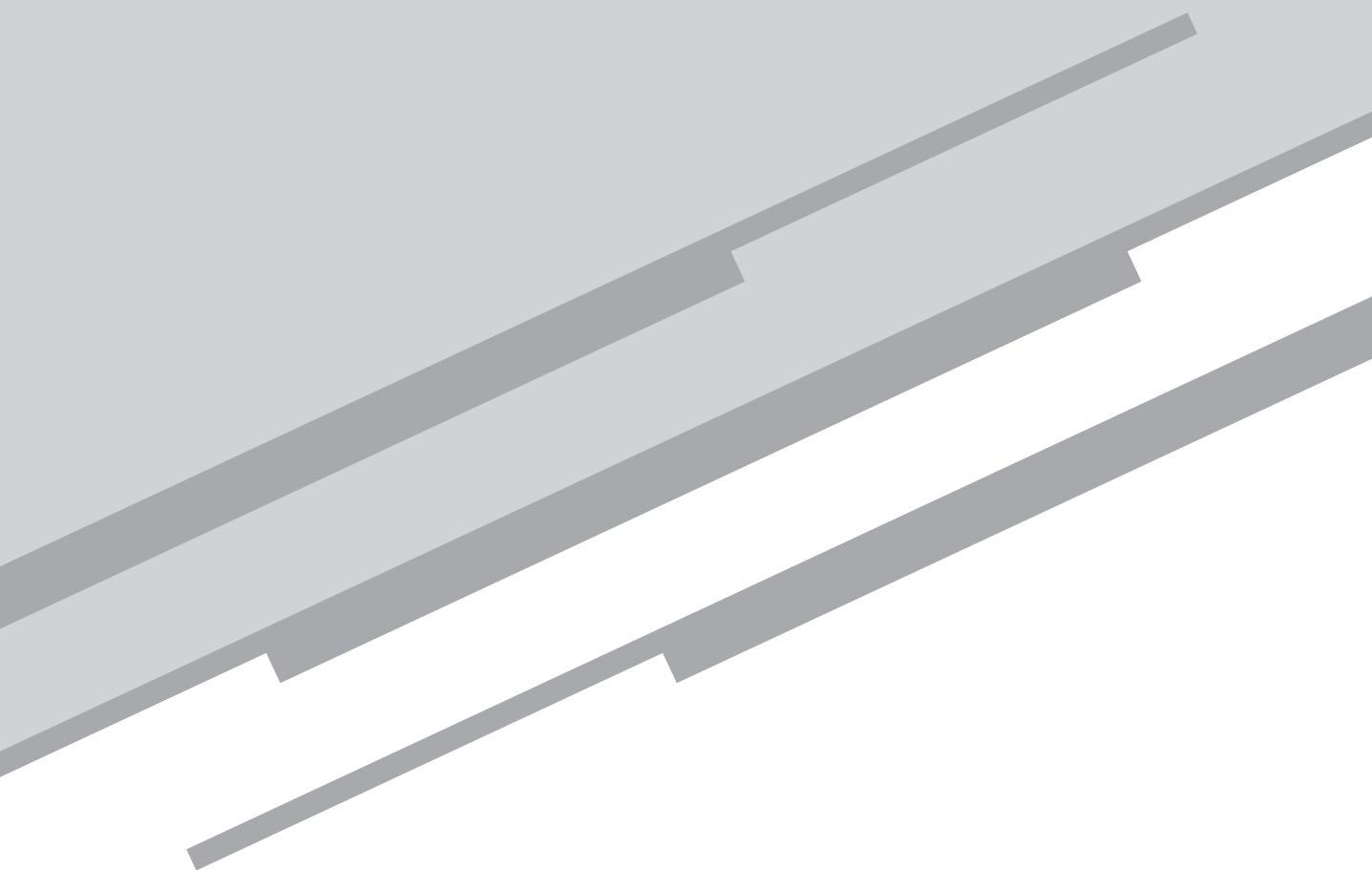
Referências bibliográficas

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

VAN VLACK, Laurence. *Princípios de ciência e tecnologia dos materiais*. Rio de Janeiro: Campus, 1994.

Aula 5

0 sistema ferro-carbono



Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila

Meta

Apresentar os principais conceitos relacionados ao diagrama de fase do sistema ferro-carbono.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. identificar características de um diagrama de fases do sistema ferro- carbono;
2. determinar as fases presentes, a composição delas e a proporção das fases para uma dada liga em uma temperatura específica;
3. diferenciar as microestruturas possíveis em função da composição química do sistema

Pré-requisito

Para você entender bem esta aula, é necessário que tenha domínio absoluto das Aulas 1 e 4 desta disciplina.

Introdução

Nesta aula vamos estudar o sistema de ligas binárias mais importantes, com os materiais metálicos mais utilizados pelo homem: o sistema ferro-carbono.

A partir desse sistema, teremos a definição de *aços* e *ferros fundidos*. Esses materiais são ligas ferrosas (nas quais o solvente é o ferro), e o que os difere é a quantidade de carbono dissolvida em solução sólida.

Os aços são mais dúcteis que os ferros fundidos por apresentarem em sua composição um teor menor de carbono. Isso faz do aço um material altamente conformável.

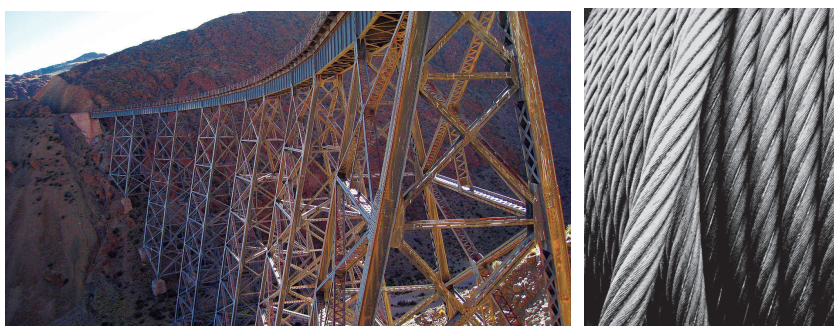


Figura 5.1: Exemplos de aplicação do aço. (a) Ponte de aço. Fonte: <https://goo.gl/a7mHxw> Créditos: Alicia Nijdam. (b) Cabos de aço.

Fonte: <https://goo.gl/CvoOJZ> Créditos: Johannes 'volty' Hemmerlein.

Alotropia do ferro

Para entender a aula de hoje, você precisará saber o significado dos conceitos de polimorfismo e alotropia. Vamos começar?

A maioria dos elementos e compostos existe em mais de uma forma cristalina para diferentes condições de temperatura e pressão. Essa condição é designada por polimorfismo ou alotropia.

Quando o sólido é uma substância composta, a mudança de estrutura cristalina é chamada de polimorfismo. Já quando o sólido é um elemento puro, a mudança de estrutura cristalina deve ser chamada de alotropia.

Tais mudanças de estrutura geralmente ocorrem em função de variações de temperatura e pressão.



Figura 5.2: Alótropos do carbono, o diamante e o grafite se apresentam com características visuais tão diferentes quanto as suas características cristalinhas!

Fonte: <https://goo.gl/qyYPgG>. Créditos: NicoFulino.

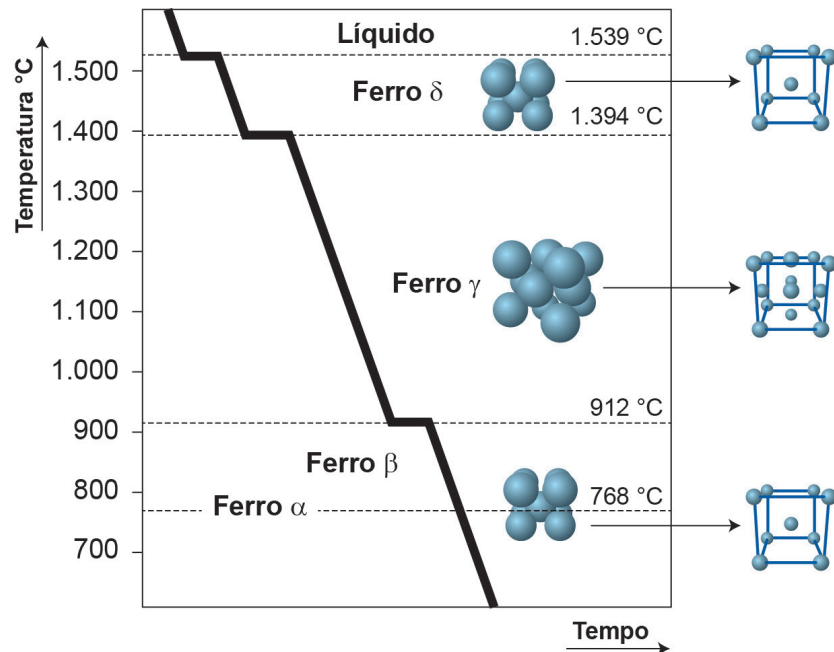


Figura 5.3: Gráfico das variações na estrutura cristalina do ferro, causadas por variações de temperatura.

Veja a **Figura 5.3**. Na temperatura ambiente, o ferro puro apresenta estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), denominado ferro alfa (α). Essa estrutura do ferro é estável até 912 °C. Nessa temperatura a estrutura CCC sofre uma transformação alotrópica para a estrutura cúbica de faces centradas (CFC), denominada ferro gama (γ) ou austenita. A austenita (CFC) é estável entre 912 e 1394 °C.

Na temperatura de 1394 °C ocorre uma nova transformação alotrópica na qual a estrutura CFC da austenita transforma-se novamente em CCC, denominada ferrita delta (δ). Essa ferrita CCC é estável até a temperatura de 1538 °C, que é a temperatura de fusão do Fe puro.

O que acabamos de estudar, foram exemplos de alotropia. Para estudarmos o polimorfismo, precisaremos utilizar diagramas de fase, tais quais aqueles que estudamos na aula passada. Vamos a eles?

Interpretação do diagrama ferro-carbono

O diagrama ferro-carbono (Fe-C) é estudado para composições que variam entre zero e 6,7% de carbono (**Figura 5.4**).

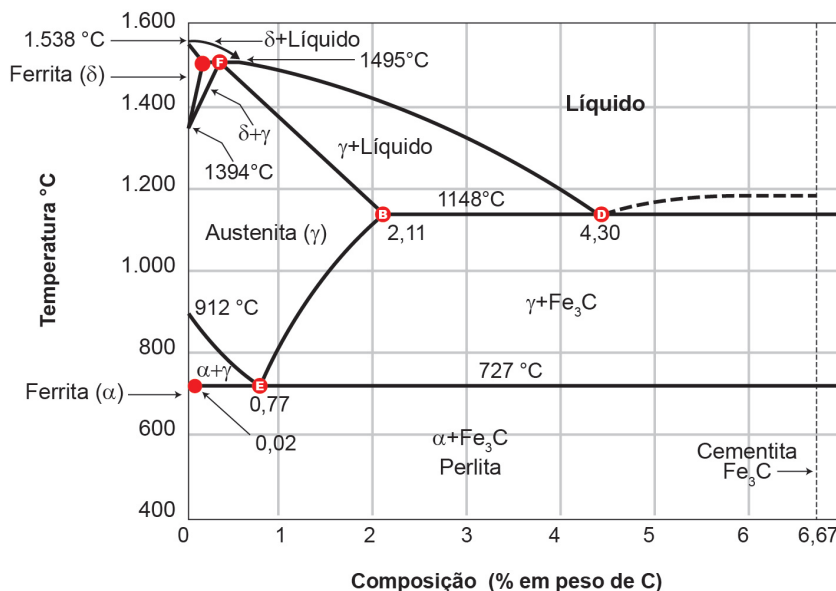


Figura 5.4: Diagrama de fase do sistema ferro-carbono.

Vamos identificar as principais características desse diagrama. Primeiramente, você deve ter observado que, diferentemente dos diagramas estudados até agora, a variação de carbono, representada no eixo horizontal, se limita a 6,7% de carbono. Devido às propriedades das ligas Fe-C, elas são de interesse comercial quando possuem até aproximadamente 4,5% de carbono, mas a 6,7% de carbono forma-se um composto químico (ou composto intermetálico) de grande importância, o Fe_3C (a cementita). Por isso, esses diagramas também são chamados de Fe- Fe_3C .



Solução sólida x composto químico

É importante sabermos diferenciar uma solução sólida de um composto químico. As *soluções sólidas* ocorrem quando pequenos átomos do soluto se localizam no reticulado cristalino do solvente (intersticial ou substitucional). A solução sólida existe para *uma proporção variável*. A solução sólida de prata em cobre (Aula 4) existe para uma proporção que varia de 0 a 7,9% de Ag a 780 °C.

O *composto químico* é uma fase constituída por átomos entre dois ou mais elementos químicos numa proporção constante, isto é, com uma *composição química constante a qualquer temperatura e no domínio da fase*. Qualquer composto que tenha uma formulação química definida é um composto químico.

O cloreto de sódio ou sal (NaCl) é um exemplo. Neste caso, o composto só se forma se existir um átomo de Cl e um de Na para haver a transferência de elétrons.

Fases sólidas presentes no sistema ferro-carbono

Neste sistema existem quatro fases sólidas: ferrita (α), austenita (γ), ferrita (δ) e a cementita (Fe_3C), sendo as ferritas e a austenita soluções sólidas, e a cementita um composto químico.

Ferrita (δ)

A ferrita é uma solução sólida de carbono em ferro α (ferro cuja estrutura cristalina é CCC). Essa fase sólida existe para baixas concentrações de carbono, uma vez que a solubilidade do carbono na estrutura CCC do ferro é baixa para temperaturas até 912 °C. A solubilidade máxima de carbono é de 0,022 % em uma temperatura de 727 °C (Ponto A da **Figura 5.5**).

Para outras temperaturas, a solubilidade é ainda menor. Podemos observar isso na linha em destaque da **Figura 5.5**.

Na temperatura ambiente, a solubilidade é de apenas 0,008 % de carbono, ou seja, muito baixa.

A ferrita é uma fase extremamente dúctil.

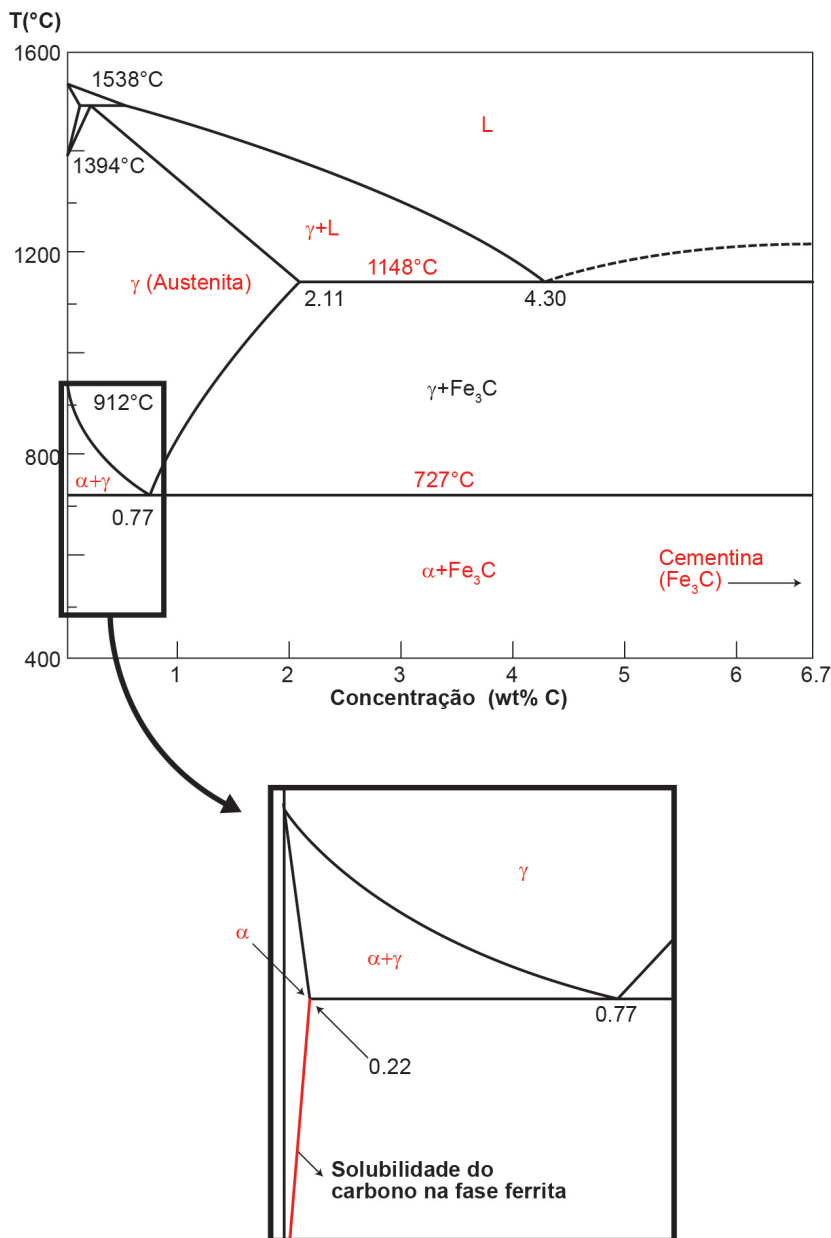


Figura 5.5: Solubilidade do carbono na fase ferrita α .

Os aços podem possuir microestrutura ferrita, ferrítica-perlítica ou austenítica, mas ele continuará sendo chamado de aço. A microestrutura muda as propriedades do aço.

Um aço para furar uma parede (broca de furadeira) tem que ser mais duro e resistente do que um aço utilizado para fabricação de uma porta de um carro (nesse caso é preciso conformar o aço para ter o formato da porta). Os dois são aços, mas apresentam microestruturas diferentes e, portanto, propriedades diferentes, uma vez que possuem teores de carbono diferentes e de outros elementos químicos também (não precisamos entrar nessa questão agora), além de processamentos diferentes.

Austenita (γ)

A austenita é uma solução sólida de carbono em ferro γ (ferro cuja estrutura cristalina é CFC).

Essa fase sólida existe para maiores concentrações de carbono, uma vez que a solubilidade do carbono na estrutura CFC é maior do que na estrutura CCC. A solubilidade máxima de carbono é de 2,14 % em uma temperatura de 1147 °C (Ponto B da **Figura 5.6**).

A austenita é uma fase dúctil. Entretanto, devido à maior concentração de carbono, essa fase é mais resistente do que a ferrita.

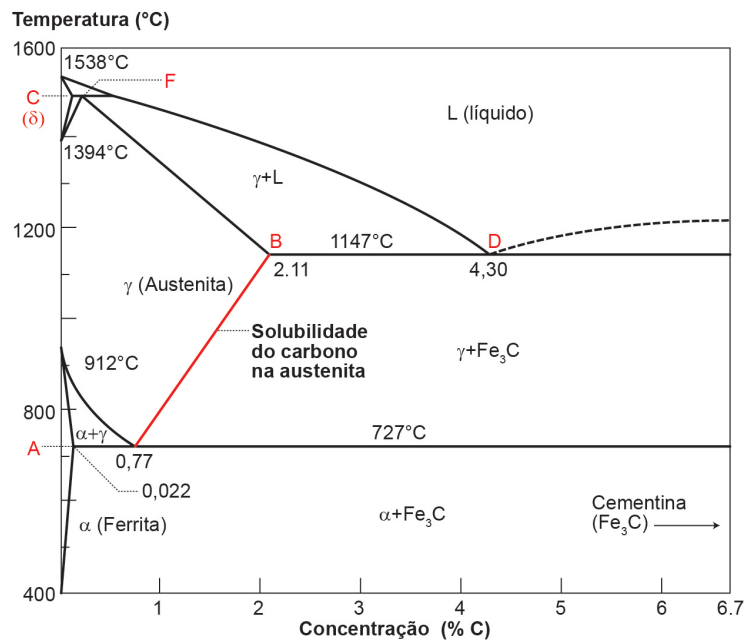


Figura 5.6: Solubilidade do carbono na fase austenita γ .

Ferrita (δ)

A ferrita δ é uma solução sólida de carbono em ferro α (ferro cuja estrutura cristalina é CCC). Essa fase sólida existe para baixas concentrações de carbono, mas se diferencia da ferrita α porque existe para temperaturas que variam entre 1394 °C e 1538 °C. A solubilidade máxima de carbono é de 0,09 % em uma temperatura de 1493 °C (Ponto C da Figura 5.7).

A solubilidade de carbono na ferrita δ é maior do que na ferrita α devido ao fato de a ferrita δ ocorrer em temperaturas mais altas, em que a agitação térmica dos átomos de ferro é maior, favorecendo a dissolução do carbono.

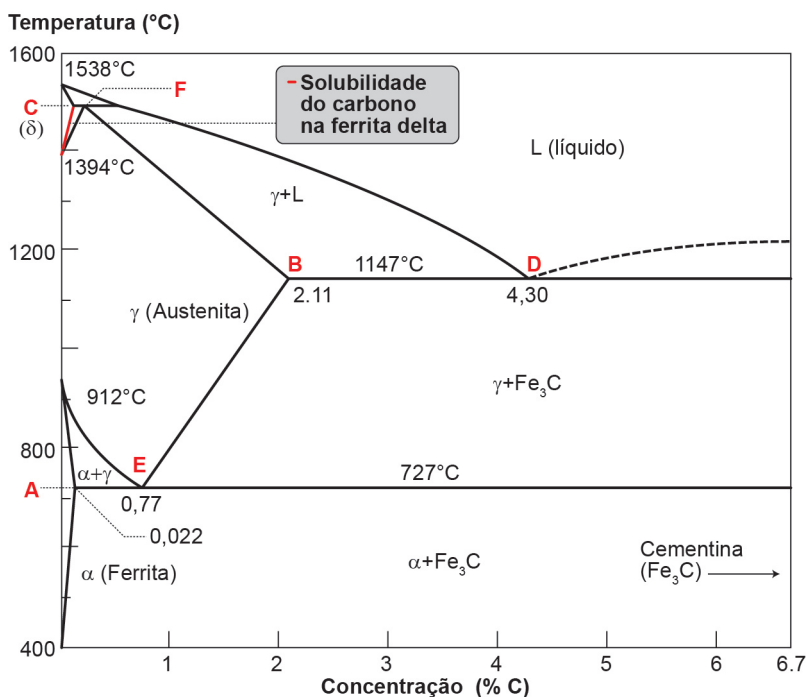


Figura 5.7: Solubilidade do carbono na fase ferrita δ .

Cementita (Fe_3C)

A cementita é um composto químico com 6,7 % de carbono em uma estrutura cristalina ortorrômbica com 12 átomos de Fe e 4 átomos de C por célula unitária. É a fase de maior dureza existente no sistema Fe-C. No caso da cementita, não falaremos sobre solubilidade, porque a cementita é um composto intermetálico e só se forma com número de átomos fixos.



O que acontece com os constituintes do aço durante o seu aquecimento?

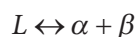
Esperamos que, neste momento da aula, você já tenha certo domínio do diagrama de fases mostrado na Figura 5.4, mas para deixar a matéria ainda mais clara, vamos assistir a uma explicação adicional em vídeo!

Acesse o vídeo em https://youtu.be/0ZcW7fz_128?t=8m48s.

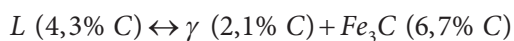
Reações

No diagrama Fe-C ocorrem algumas reações importantes. Vamos detalhá-las!

a) Reação eutética (ponto D da **Figura 5.8**)



A reação eutética já foi estudada na Aula 4. Temos a fase líquida, em uma temperatura específica (temperatura eutética) se transformando em duas fases sólidas distintas. No caso específico do sistema Fe-C, a reação eutética acontece a 1147 °C e o ponto eutético D a uma composição de 4,3% C. A fase líquida se transforma em austenita e cementita. No ponto D, a reação que ocorre é a seguinte:



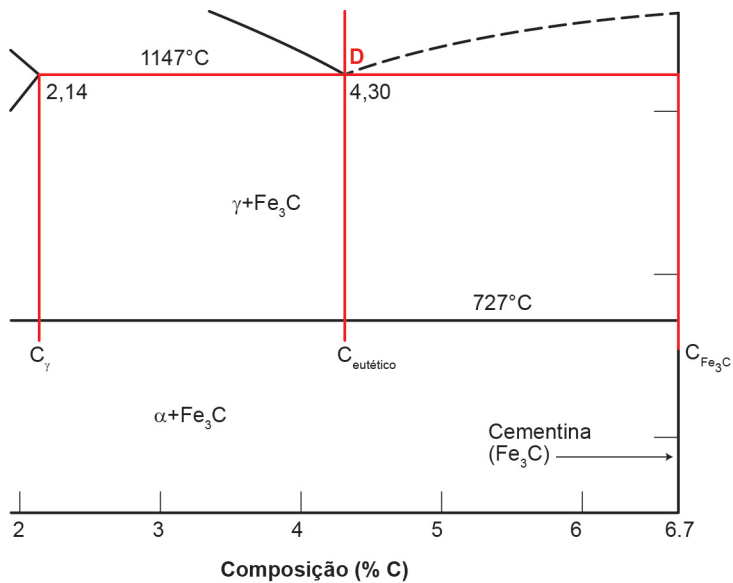
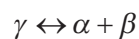


Figura 5.8: Diagrama Fe-C, com destaque para a reação eutética. A linha em destaque no gráfico é a linha de amarração utilizada para determinar a composição das fases conforme visto na Aula 4.

b) Reação eutetoide (ponto E da **Figura 5.9**)



A reação eutetoide ocorre transformando uma fase sólida em duas outras fases sólidas distintas. Ela também ocorre em uma temperatura específica. No caso do sistema Fe-C, a reação eutética acontece a 727 °C, e o ponto eutetoide a uma composição de 0,77% C. A fase austenítica se transforma em ferrita (α) e cementita.

No ponto E, a reação que ocorre é a seguinte:

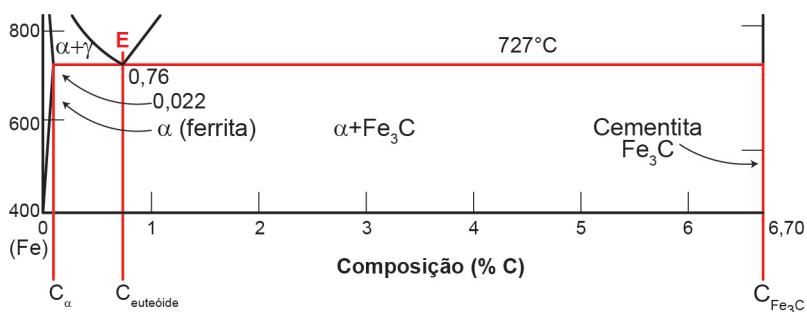
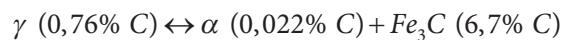
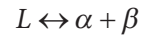


Figura 5.9: Diagrama Fe-C, com destaque para a reação eutetoide.

c) Reação peritética (ponto F da **Figura 5.10**)

A reação peritética ocorre transformando uma mistura de duas fases, uma líquida e outra sólida, em uma única fase sólida diferente da fase sólida que a originou.

Ela também ocorre em uma temperatura específica. No caso do sistema Fe-C, a reação peritética acontece a 1493 °C, e o ponto peritético a uma composição de 0,17% C.

A mistura das fases líquida + ferrita (δ) se transforma em austenita. No ponto F, a reação que ocorre é a seguinte:

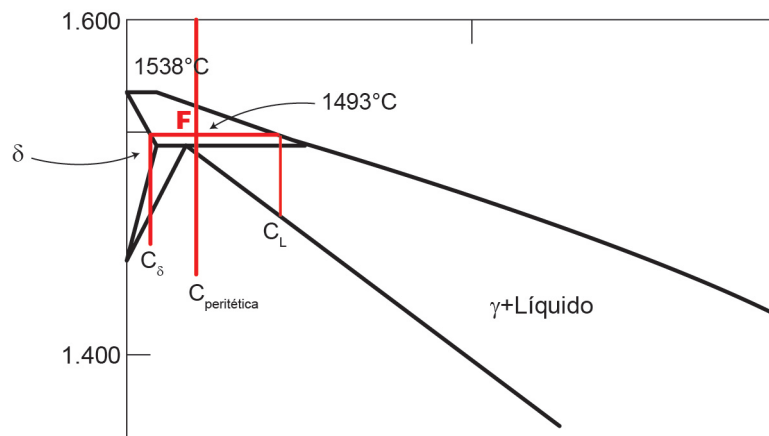
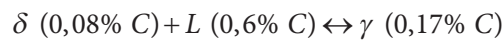


Figura 5.10: Diagrama Fe-C, com destaque para a reação peritética.

Linhas relevantes

Observe o diagrama da **Figura 5.11**.

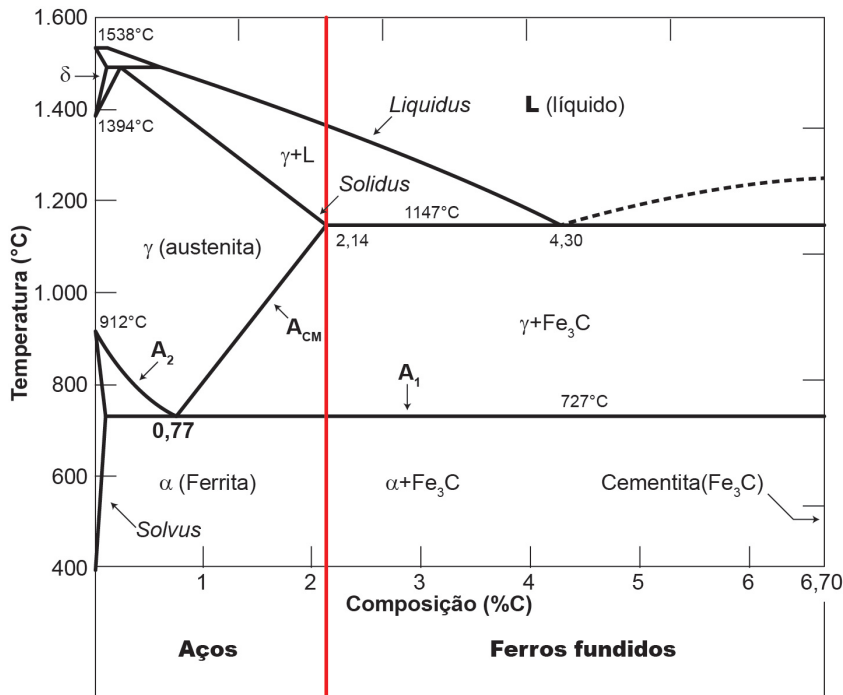


Figura 5.11: Diagrama de fase, com destaque para as principais linhas.

As ligas formadas no sistema Fe-C se dividem em dois grandes grupos e são comercialmente conhecidas por: aços e ferros fundidos, como pode ser visto pela linha vertical em destaque na **Figura 5.11**. Os aços são as ligas com composições até 2,14 % de carbono. Já os ferros fundidos são ligas que possuem de 2,14 até aproximadamente 4,5 % de carbono.



Dois irmãos muito importantes para a Ciência dos Materiais

O aço e o ferro fundido se comportam como se fossem dois irmãos. São muito parecidos (inclusive em sua composição química), porém possuem vocações diferentes!

Para conhecer mais as características do ferro fundido, assista ao vídeo em <https://youtu.be/Bs90acfHGsk?t=23s>.

E então, vamos às linhas relevantes?

Vamos fazer o seguinte: vamos utilizar a **Figura 5.12** para guiar a compreensão do texto que virá na sua sequência. Tudo bem?

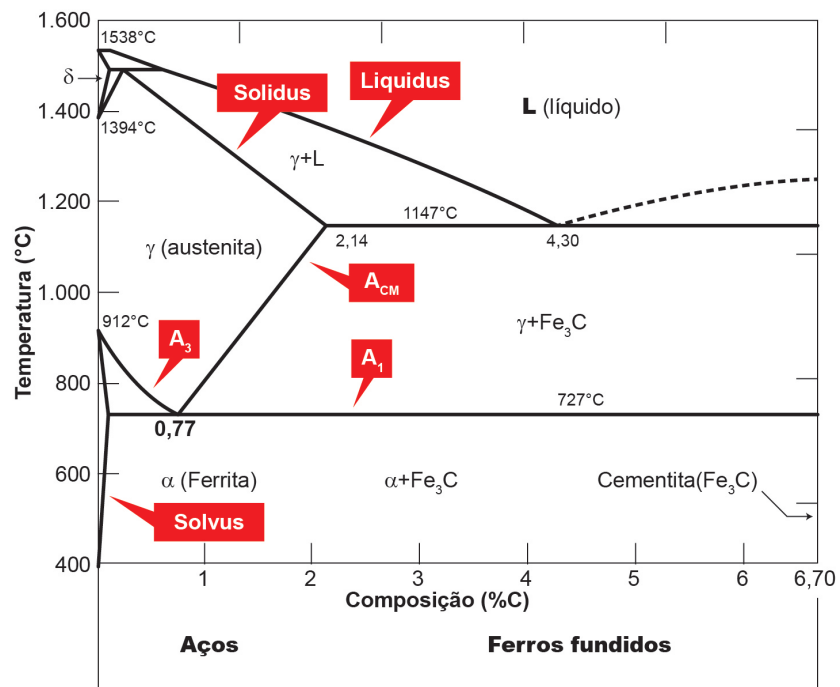


Figura 5.12: Diagrama ferro-carbono com as principais linhas em destaque.

Linha A1: indica a transformação $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$, ou seja, a temperatura de transformação eutetoide.

Linha A3: indica a temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \alpha$. À medida que o teor de carbono vai aumentando, a temperatura A3 vai diminuindo, até o limite de 727 °C, onde se encontra com A1.

Linha A_{cM} : indica a temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$. Inicia-se a 727 °C com 0,77% C e vai aumentando com a elevação do teor de carbono, até atingir 1148 °C a 2,14% C.

Linha solidus: indica que abaixo desta linha todo material estará no estado sólido.

Linha liquidus: indica que acima desta linha todo material estará na forma líquida.

Linha solvus: indica o limite de solubilidade de carbono na ferrita (estrutura CCC do ferro).

Atividade 1

Atende ao objetivo 1

Em relação ao diagrama do sistema ferro-carbono, assinale a opção correta.

- (a) A linha A_1 representa a reação eutetoide.
 - (b) A reação eutetoide transforma austenita em ferrita.
 - (c) Um aço com teor de carbono inferior a 4,3% será exclusivamente constituído de austenita ao ultrapassar a linha *liquidus*.
 - (d) Aços hipoeutetoides têm microestrutura formada por perlita e cementita e um teor de carbono abaixo de 0,77%.
-
-

Resposta comentada

- (a) Correta.
 - (b) Errada. A reação eutetoide ocorre a 727 °C e transforma a fase sólida austenita em duas outras fases sólidas: ferrita e cementita.
 - (c) Errada. Aços possuem no máximo 2,14 % de carbono. Além disso, acima de 4,3 % não existe a fase austenítica.
 - (d) Errada. Aços hipoeutetoides possuem um teor de carbono abaixo de 0,77 %, mas a fase primária é ferrita. Portanto, a microestrutura é composta de ferrita e perlita.
-
-

Composição e proporção das fases

Composição das fases

Para determinar a composição e proporção das fases, vamos utilizar as mesmas regras já estudadas na Aula 4. Em regiões monofásicas, a composição da fase é a mesma da liga. Em regiões bifásicas, traçaremos uma linha horizontal, chamada de linha de amarração, na temperatura em que se encontra a liga. Vamos analisar um aço com 0,5% C

através dos pontos A, B e C, representados no diagrama a seguir (Figura 5.13), onde se encontra em destaque a linha de amarração.

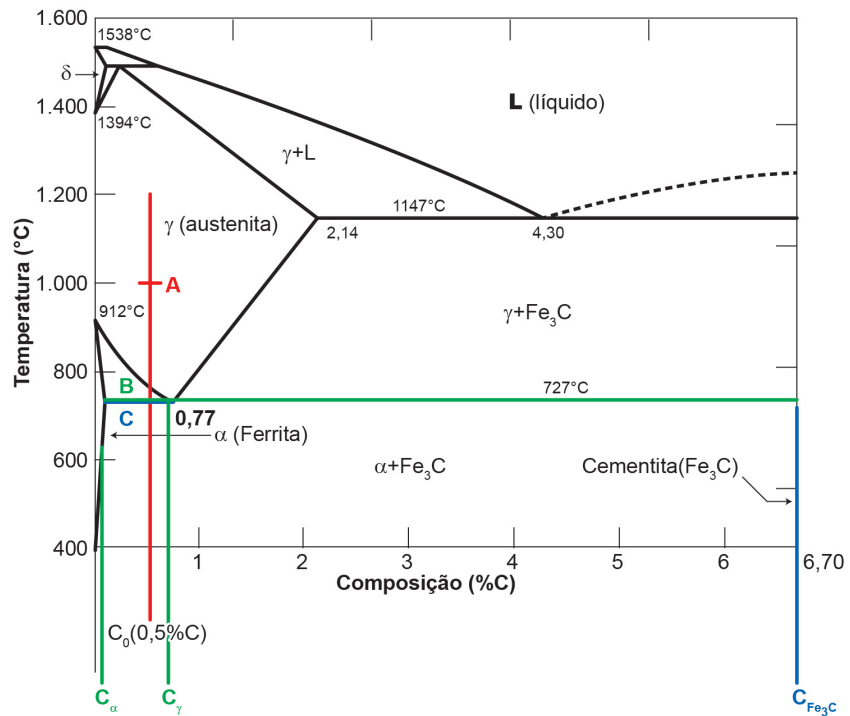


Figura 5.13: Diagrama de fase destacando um aço com composição de 0,5% C.

Ponto A (temperatura de 1000 °C): o aço é todo austenítico; portanto, a composição da fase austenítica é de 0,5% de C.

Ponto B (temperatura de 728 °C): nessa temperatura (imediatamente acima da reação eutetoide), o aço se encontra em uma região bifásica (ferrita + austenita); portanto, para determinar a composição de cada fase, precisamos traçar a linha de amarração. Então:

Fase α (ferrita) → 0,022% C

Fase γ (austenita) → 0,77% C

Ponto C (temperatura de 726 °C): nessa temperatura (imediatamente abaixo da reação eutetoide), o aço se encontra em uma região bifásica (ferrita + cementita); portanto, para determinar a composição de cada fase, precisamos traçar a linha de amarração. Então:

Fase α (ferrita) → 0,022% C

Fase Fe₃C (cementita) → 6,7% C

Proporção das fases

Para calcular a proporção das fases, vamos utilizar a mesma linha de amarração utilizada na **Figura 5.13** para realizar a regra da alavanca.

Regra da alavanca

Na Aula 4, já falamos sobre a regra da alavanca, quando começamos a estudar diagramas de fase. Mas vamos lembrá-la!

A mesma linha de amarração utilizada para determinar a composição das fases é utilizada na regra da alavanca. Então:

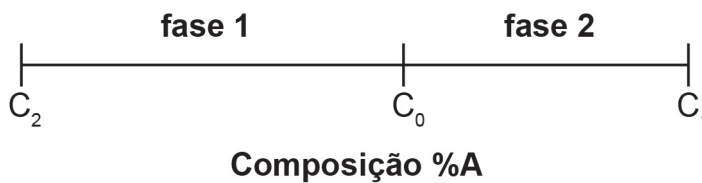


Figura 5.14: Linha de amarração para a regra da alavanca.

Para calcular a fração da fase 1, utilizaremos o intervalo entre a composição da liga e a composição da outra fase, ou seja, a fase 2.

$$W_1 = \frac{C_0 - C_1}{C_1 - C_2}$$

$$W_2 = \frac{C_1 - C_0}{C_1 - C_2}$$

em que

W_1 = porcentagem da fase 1,

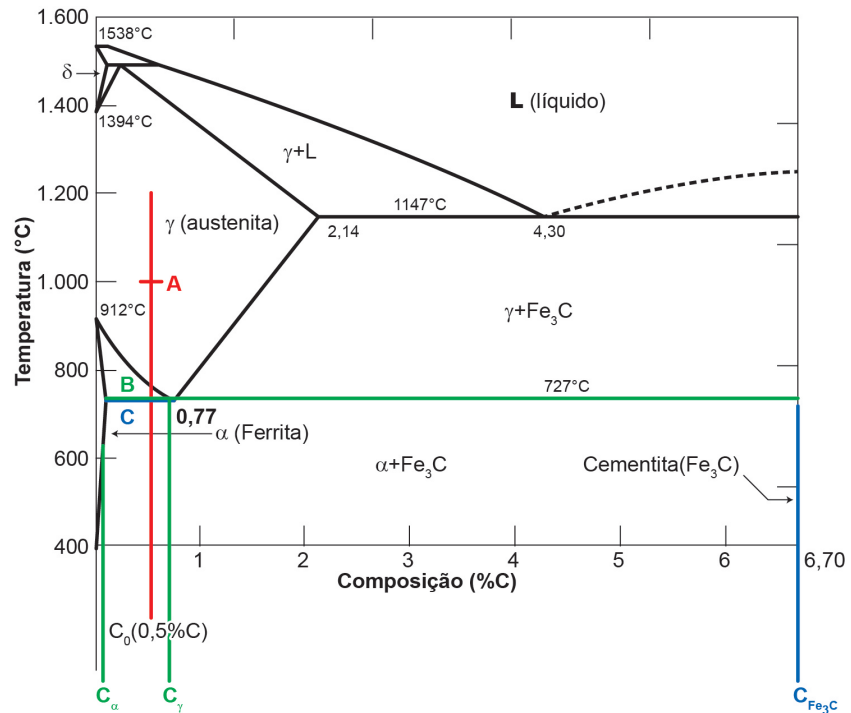
C_1 = porcentagem do elemento A na fase 1,

C_0 = porcentagem do elemento A da liga (ou seja, o total de A na liga),

C_2 = porcentagem do elemento A na fase 2,

W_2 = porcentagem da fase 2.

Agora, vamos repetir a **Figura 5.13** aqui, para facilitar a sua visualização enquanto você lê o conteúdo das próximas páginas. Veja:

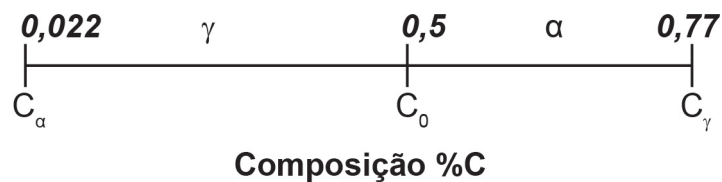


Ponto A (temperatura de 1000 °C): o aço é todo austenítico; portanto, 100 % é de fase austenítica.

Ponto B (temperatura de 728 °C): nessa temperatura (imediatamente acima da reação eutetoide), o aço se encontra em uma região bifásica (ferrita + austenita). Para determinar a proporção de cada fase, temos:

$$\text{Fase } \alpha \text{ (0,022\% C)} \quad \% \alpha = \frac{0,77 - 0,5}{0,77 - 0,022} = 0,36 \text{ ou } 36\% \alpha$$

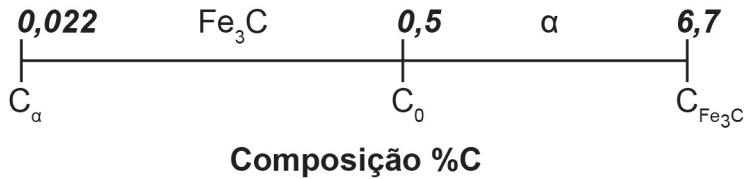
$$\text{Fase } \gamma \text{ (0,77\% C)} \quad \% \gamma = \frac{0,5 - 0,022}{0,77 - 0,022} = 0,64 \text{ ou } 64\% \gamma$$



Ponto C (temperatura de 726 °C): nessa temperatura (imediatamente abaixo da reação eutetoide), o aço se encontra em uma região bifásica (ferrita + cementita). Para determinar a proporção de cada fase, temos:

$$\text{Fase } \alpha \text{ (0,022\% C)} \quad \% \alpha = \frac{6,7 - 0,5}{6,7 - 0,022} = 0,93 \text{ ou } 93\% \alpha$$

$$\text{Fase } \text{Fe}_3\text{C (6,7\% C)} \quad \% \text{Fe}_3\text{C} = \frac{0,5 - 0,022}{6,7 - 0,022} = 0,07 \text{ ou } 7\% \text{Fe}_3\text{C}$$



Vamos consultar o catálogo?

Caro aluno, ao longo da sua vida profissional, muito provavelmente você terá que manusear alguns catálogos com nomenclaturas do aço. Essas nomenclaturas são dadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e levam em conta diversos fatores. O mais importante deles é a composição química do aço! Para saber mais, acesse: <https://youtu.be/UI57o6l0-3c?t=1m30s>.

Atividade 2

Atende ao objetivo 2

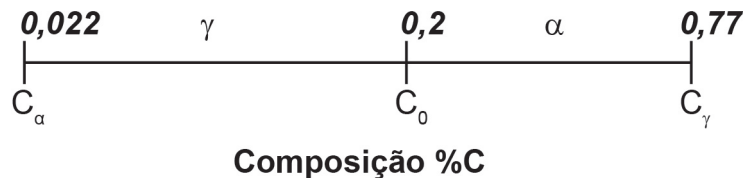
Calcule o percentual de fase primária de um aço ABNT 1020 com 0,2% de carbono. Qual o percentual de perlita?

Resposta comentada

Para calcular a fase primária, é necessário utilizar a regra da alavanca imediatamente antes de ocorrer a reação eutetoide. Então saberemos a porcentagem de ferrita primária (com essa composição, trata-se de um aço hipoeutetoide) bem como a de austenita (que, após a reação eutetoide, se transforma em perlita). Então temos:

$$\text{Fase } \alpha \text{ (0,022\% C)} \quad \% \alpha = \frac{0,77 - 0,2}{0,77 - 0,022} = 0,76 \text{ ou } 76\% \alpha$$

$$\text{Fase } \gamma \text{ (0,77\% C)} \quad \% \gamma = \frac{0,2 - 0,022}{0,77 - 0,022} = 0,24 \text{ ou } 24\% \gamma$$



Podemos concluir que teremos 76% de ferrita primária e 24% de perlita.

Desenvolvimento da microestrutura

A microestrutura é a morfologia de uma dada fase ou conjunto de fases que coexiste a uma dada composição química, temperatura e pressão. No caso do estudo dos materiais, o que interessa é a morfologia à *temperatura ambiente*.

No diagrama do sistema ferro-carbono, vamos estudar o desenvolvimento da microestrutura para as ligas dentro do campo de existência do aço, mostradas no gráfico da **Figura 5.15**. Podemos observar que, para qualquer composição de aços durante o resfriamento, a solução passa pelo campo austenítico. Então, vamos desenvolver a microestrutura a partir do campo austenítico para as quatro ligas da figura a seguir.

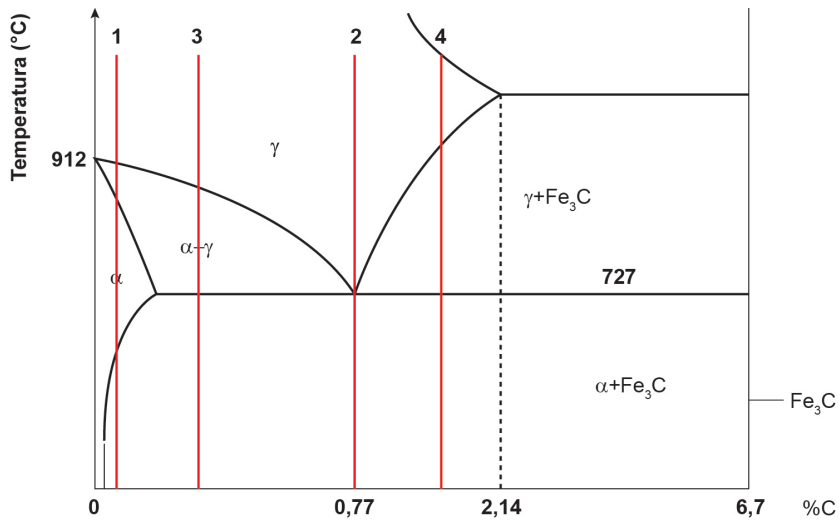


Figura 5.15: Diagrama de fase destacando quatro ligas para desenvolvimento da microestrutura.

a) Liga 1 (aço com composição abaixo de 0,022% de C)

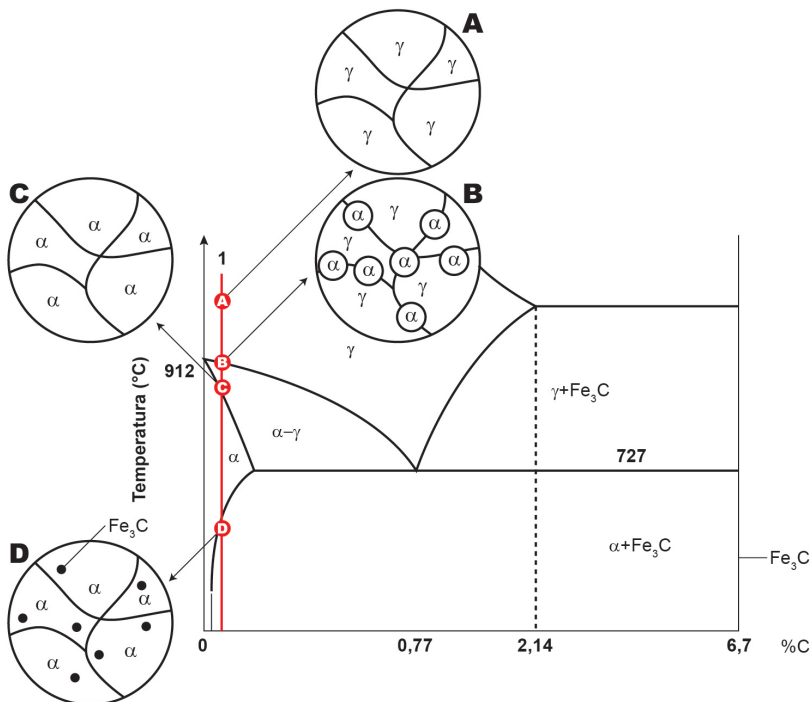


Figura 5.16: Desenvolvimento da microestrutura para liga de aço com composição abaixo de 0,022% de C.

Ponto A: a solução está totalmente solidificada e temos apenas uma fase: austenítica.

Ponto B: atinge-se a temperatura A_3 ; portanto, começa a nucleação de uma nova fase sólida: ferrítica. A nucleação dessa nova fase ocorre preferencialmente nos contornos de grão da austenita. O resfriamento continua até atingirmos o ponto C.

Ponto C: neste ponto, toda a transformação no estado sólido já ocorreu e, então, a liga é formada apenas pela fase α . O resfriamento continua até a temperatura *solvus*.

Ponto D: a partir da temperatura *solvus*, como se atinge o limite de solubilidade do C na ferrita, se precipita outra fase sólida: a da cementita. O resfriamento continua até a temperatura ambiente, sem haver nenhuma alteração das fases presentes. O que vai mudar é apenas a composição de cada fase, uma vez que a linha de amarração vai mudando para cada temperatura.

A microestrutura final é formada por grãos da fase ferrítica com precipitados de cementita, distribuídos aleatoriamente. Essa microestrutura ocorrerá para todas as ligas de composições entre zero e 0,022% de carbono.

b) Liga 2 (aço com composição de 0,77% de C)

Vamos estudar a microestrutura da liga 2, que é exatamente a liga eutetoide (composição do ponto eutetoide), e só existe na composição fixa de 0,77% C. A reação eutetoide ($\gamma \leftrightarrow \alpha + \beta$) gera um grão com uma morfologia particular na forma lamelar alternada das fases α e β .

No sistema Fe-C, na reação eutetoide, ocorre a transformação da fase austenítica em ferrita e cementita lamelar conforme podemos observar na **Figura 5.17**.

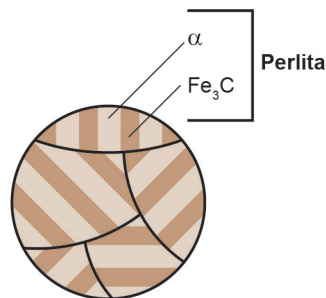


Figura 5.17: Morfologia lamelar do grão formado a partir da reação eutetoide

do sistema Fe-C.

Essa microestrutura lamelar de ferrita e cementita é chamada de perlita. Então podemos dizer que o grão é perlítico.

Vamos então à microestrutura da liga eutetoide.

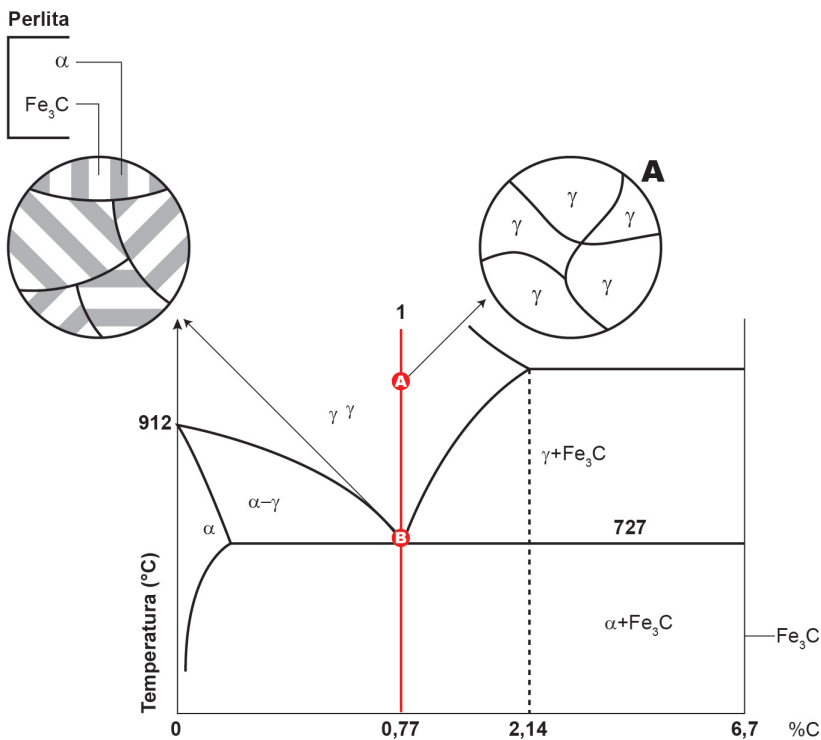


Figura 5.18: Desenvolvimento da microestrutura para liga 0,77% C (eutetoide).

Ponto A: a solução está totalmente solidificada e temos apenas uma fase: austenítica.

Ponto B: atinge-se a temperatura eutetoide e então acontece a reação. O resfriamento continua até a temperatura ambiente, sem haver nenhuma alteração das fases presentes. Apenas vai mudar a composição de cada fase, uma vez que a linha de amarração vai mudando para cada temperatura.

A microestrutura final é formada por grãos lamelares de fases ferrita e cementita (perlita).

c) Liga 3 (aço com composição entre 0,022% C e 0,77% C)

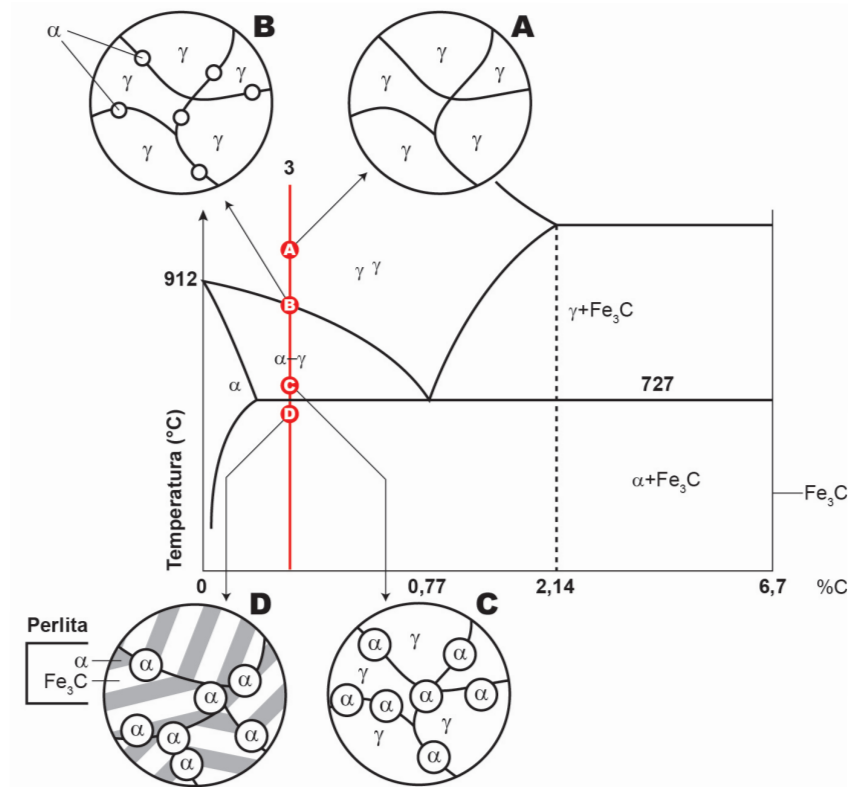


Figura 5.19: Desenvolvimento da microestrutura para ligas de composição entre 0,022% C e 0,77% C.

Ponto A: a solução está totalmente solidificada e temos apenas uma fase: austenítica.

Ponto B: atinge-se a temperatura A3; portanto, começa a nucleação de uma nova fase sólida: ferrítica. A nucleação dessa nova fase ocorre preferencialmente nos contornos de grão da austenita. O resfriamento continua até atingirmos a temperatura eutetoide (727 °C).

Ponto C: antes de atingir a temperatura eutetoide, uma fração da liga é formada por ferrita, e o restante ainda se encontra na fase austenítica. Ao atingir a temperatura eutetoide, a reação acontece na fração da liga que se encontra na fase austenítica.

Ponto D: para temperaturas abaixo da eutetoide, o resfriamento continua até a temperatura ambiente, sem haver nenhuma alteração das fases presentes. Apenas vai mudar a composição de cada fase, uma vez que a linha de amarração vai mudando para cada temperatura.

A microestrutura final é formada por grãos da fase ferrítica que se formaram antes da reação eutetoide (fase denominada de fase primária ou proeutetoide) e por grãos lamelares de fases ferrita e cementita (per-

lita) provenientes da reação eutetoide.

Essa microestrutura ocorrerá para todas as ligas de composições entre 0,022% C e 0,77% C (ponto eutetoide). As ligas nesse intervalo de composição (composições à esquerda do ponto eutetoide) são chamadas de hipoeutetoides.

d) Liga 4 (aço com composição entre 0,77% C e 2,14% C)

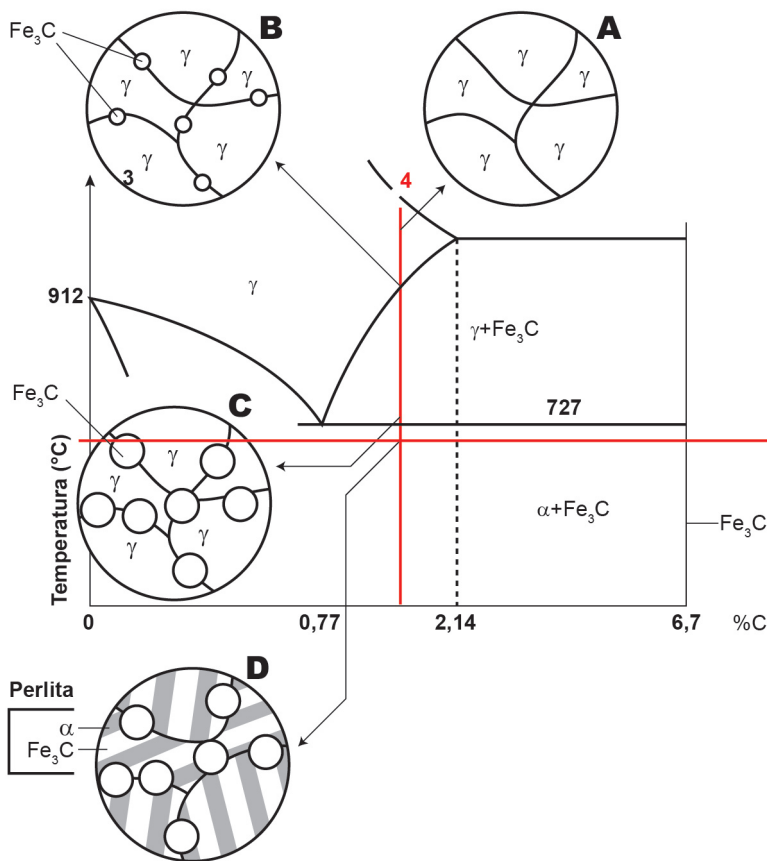


Figura 5.20: Desenvolvimento da microestrutura para ligas de composição entre 0,77% C e 2,14% C.

Ponto A: a solução está totalmente solidificada e temos apenas uma fase: austenítica.

Ponto B: atinge-se a temperatura ACM; portanto, começa a nucleação de uma nova fase sólida: cementita. A nucleação dessa nova fase ocorre preferencialmente nos contornos de grão da austenita. O resfriamento continua até atingirmos a temperatura eutetoide (727 °C).

Ponto C: antes de atingir a temperatura eutetoide, uma fração da liga é formada por cementita, e o restante ainda se encontra na fase austenítica. Ao atingir a temperatura eutetoide, a reação acontece na fração da liga que se encontra na fase austenítica.

Ponto D: para temperaturas abaixo da eutetoide, o resfriamento continua até a temperatura ambiente, sem haver nenhuma alteração das fases presentes. Apenas vai mudar a composição de cada fase, uma vez que a linha de amarração vai mudando para cada temperatura.

A microestrutura final é formada por grãos de cementita que se formaram antes da reação eutetoide (fase denominada de fase primária ou proeutetoide) e por grãos lamelares de fases ferrita e cementita (perlita) provenientes da reação eutetoide.

Atividade 3

Atende ao objetivo 4

No diagrama de fases ferro-carbono, uma liga com 0,9 % em peso de carbono, é aquecida até o campo austenítico. Após, é homogeneizada e, então, é resfriada lentamente até a temperatura ambiente exibir as fases:

- (a) perlita, ferrita proeutetoide e cementita.
- (b) perlita e cementita proeutetoide.
- (c) cementita proeutetoide e ferrita.
- (d) ferrita e cementita.
- (e) ferrita e perlita.

Resposta comentada

A resposta correta é a letra (b). Uma liga com 0,9% de carbono é classificada de aço. Como a composição é maior que a composição do ponto eutetoide é chamada de aço hipereutetoide. Para esses aços, a fase primária ou proeutetoide (fase sólida que se forma durante o resfriamento antes de se atingir a temperatura eutetoide) é a cementita. Após a reação eutetoide, temos a formação da perlita a partir da austenita.

Atividade 4

Atende ao objetivo 1

Considere as afirmações a seguir em relação ao diagrama de equilíbrio de fases ferro-carbono.

I. O carbono é completamente solúvel no ferro para qualquer faixa de concentrações.

II. O ponto eutetoide (0,76% de carbono e 727 °C) é caracterizado pela existência simultânea de uma fase sólida e duas fases líquidas.

III. Na concentração de 4,30% de carbono e temperatura de 1147 °C, há a existência de uma fase líquida e de duas fases sólidas, e esse ponto é denominado ponto eutético.

Está correto o contido em

- (a) I, apenas.
- (b) II, apenas.
- (c) III, apenas.
- (d) I e III, apenas.
- (e) I, II e III.

Conclusão

O sistema ferro-carbono é de grande importância no estudo de matérias metálicas ferrosas. É possível prever as fases presentes e a quantidade de cada fase. Essas informações nos ajudam a conhecer o comportamento do material.

No entanto, as microestruturas previstas no diagrama ocorrem apenas quando temos um resfriamento “lento”, ou seja, dentro do equilíbrio.

Além do carbono, alguns aços possuem outros elementos adicionados (Cr, Ni, Mo, Mn, V entre outros) com o objetivo de obter uma característica específica como, por exemplo, a inoxidabilidade. Esses elementos podem alterar os campos de existência das fases dentro diagrama. Entretanto, só é possível mudar as características dos aços com

a introdução de outros elementos conhecendo as fases existentes *sem* esses elementos.

Resumo

Nesta aula estudamos que:

- O ferro puro a temperatura ambiente é CCC (ferro α). Ao atingir a temperatura de 912 °C, passa a ter estrutura CFC (ferro γ). A 1394 °C volta a ter estrutura CCC (ferro δ). Essas mudanças de estrutura são conhecidas por alotropia.
- Aços são definidos como sendo ligas ferro-carbono com até 2,11% de carbono. Já os ferros fundidos são ligas de ferro-carbono com teores de carbono entre 2,11 e 6,7%.
- As fases sólidas presentes no sistema ferro-carbono são ferritas α e δ , austenita e cementita.
- As principais reações são: a eutética (4,3% C a 1147 °C), a eutetoide (0,77% C a 727 °C) e a peritética (0,08% C a 1493 °C).
- As linhas relevantes são: A1 (reação eutetoide), A2 (transformação magnética), A₃, A_{CM}, solidus, liquidus, solvus.
- Para cálculo das porcentagens das fases, utiliza-se a regra da alavanca.
- A microestrutura proveniente da reação eutetoide é chamada de perlita (lamelas alternadas de ferrita e cementita).
- Para aços hipoeutetoides, a microestrutura final é ferrita + perlita; para aços hipereutetoides, cementita + perlita.

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, estudaremos o processo de difusão atômica, ou seja, como os átomos se movimentam dentro da estrutura cristalina.

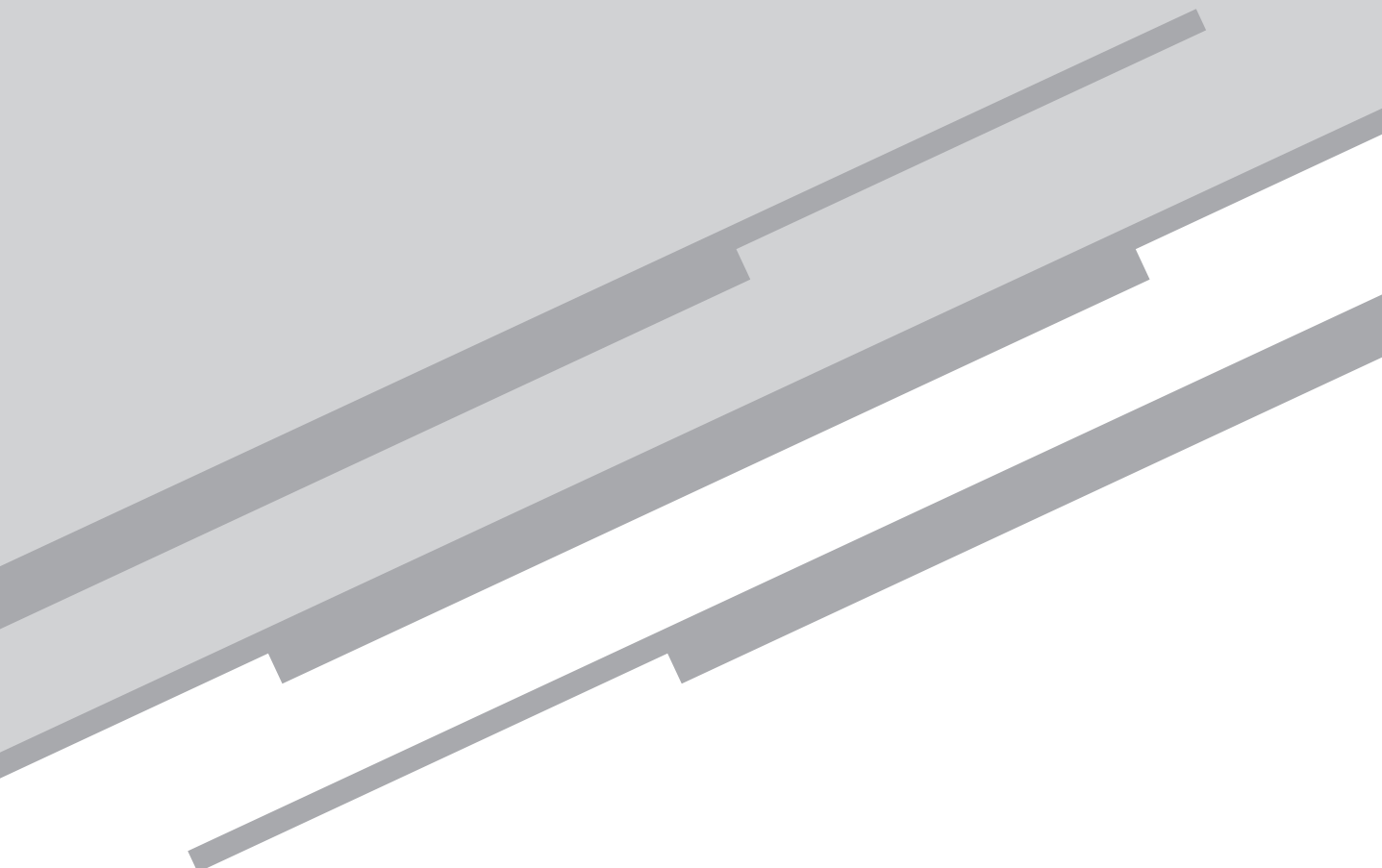
Referências

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

VAN VLACK, Laurence. *Princípios de ciência e tecnologia dos materiais*. Rio de Janeiro: Campus, 1994.

Aula 6

Difusão atômica



Valéria Vasconcellos de Ávila

Meta

Apresentar os principais conceitos relacionados à difusão dos átomos em sólidos metálicos.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

- descrever quais os principais parâmetros para que ocorra a difusão atômica;
- interpretar e aplicar a 1ª Lei de Fick;
- interpretar e aplicar a 2ª Lei de Fick.

Introdução

Quando você era criança, você chegou a brincar com aqueles balões cheios de gás hélio? E que, no dia seguinte, começavam a murchar e já não flutuavam mais. Por que será que isso acontece, se eles não estão furados?

O balão murcha devido ao processo de difusão. Nesse processo, os átomos se movimentam aleatoriamente quando termicamente ativados. No caso do balão, os átomos de hélio podem difundir-se lentamente através de sua parede, esvaziando-o. Isso acontece porque existe um gradiente de concentração de hélio no interior do balão (ou seja, ele está cheio de gás), mas há pouco hélio no lado externo. A taxa de transporte é governada pela **difusividade** (característica do átomo) e o gradiente de concentração.

A difusão também está presente em alguns processos industriais, tais como:

- nucleação e crescimento de novas fases em sólidos cristalinos: quando estudamos diagramas de fase, vimos que a austenita se transforma em perlita (ferrita + cementita) a 727 °C. Para que isso ocorra, é preciso que o carbono se movimente (difunda) no interior do reticulado cristalino do ferro.
- cementação dos aços: tratamento termoquímico que consiste em introduzir carbono na superfície do aço pelo mecanismo de difusão atômica, com o objetivo de se aumentar a dureza superficial do material.
- fabricação de dispositivo semicondutores: alteração do comportamento do silício transformando-o em um condutor através da dopagem, ou seja, introdução por difusão de uma pequena quantidade de impurezas (fósforo e arsênico, por exemplo) em um cristal de silício.

No interior dos sólidos, a difusão ocorre por movimentação de átomos (no caso de metais), de cátions e ânions (no caso de cerâmicas), e de macromoléculas (no caso de polímeros).

Nesta aula, trataremos dos materiais metálicos sólidos. Neles, o movimento atômico é bastante restrito, pois as forças de ligação atômicas são elevadas além da existência de posições de equilíbrio bem definidas (vimos em aulas passadas a definição de estrutura cristalina).

Difusividade atômica ou coeficiente de difusão

Capacidade de um átomo de solutos se moverem pelo reticulado cristalino de um solvente.

A difusividade é encontrada na lei de Fick, como estudaremos ainda nesta aula.

Mecanismos de difusão

Os átomos em um cristal só ficam estáticos no zero absoluto (-273 °C). Acima dessa temperatura, os átomos vibram, mas, em temperaturas baixas, essa vibração é pouca, e a energia do átomo é insuficiente para fazê-lo mudar de posição dentro do reticulado. Com o aumento da temperatura, as vibrações térmicas aumentam e dispersam aleatoriamente os átomos para posições de menor energia.



Nem todos os átomos possuem a mesma energia, e poucos atingem energia suficiente para difundirem.

A taxa de movimentação dos átomos está associada à temperatura do material pela equação de *Arrhenius*. Segundo essa equação:

$$\text{Taxa} = C_0 e^{-\frac{Q}{RT}}, \text{ em que}$$

C_0 = constante;

R = constante universal dos gases = 1,987 cal/mol-K;

T = temperatura absoluta (K);

Q = energia de ativação (cal/mol).

Essa equação pode ser linearizada, facilitando sua interpretação e a leitura de sua representação gráfica (**Figura 6.1**). Para linearizar, aplicamos logaritmo *neperiano* (\ln) nos dois lados da equação de *Arrhenius*.

$$\ln(\text{taxa}) = \ln C_0 - \frac{Q}{RT}$$

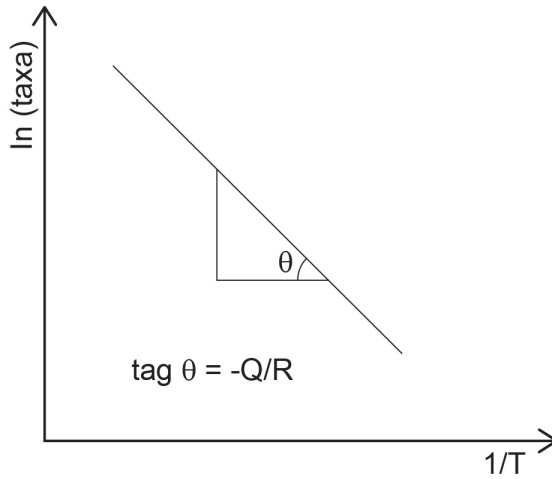


Figura 6.1: Representação gráfica da equação de Arrhenius linearizada.

Para entender melhor, vamos supor, por exemplo, que determinados átomos intersticiais se movam de uma posição no reticulado para outra a taxas de 5×10^8 saltos/s a 500°C e 8×10^{10} saltos/s a 800°C . Para calcular a energia de ativação para o processo, utilizaremos a equação de Arrhenius para cada situação:

$$5 \times 10^8 = C_0 e^{\frac{-Q}{1,987(500+273)}} = C_0 e^{(-0,000651Q)},$$

$$8 \times 10^{10} = C_0 e^{\frac{-Q}{1,987(800+273)}} = C_0 e^{-0,000469Q}$$

Dividindo uma equação pela outra, temos: $160 = e^{(0,000651-0,000469)Q}$.

Aplicando \ln em cada um dos lados da equação, temos:

$$\ln 160 = (0,000651 - 0,000469)Q$$

$$Q = \frac{\ln 160}{0,000182} = 2785,57 \text{ cal/mol}.$$

Vamos construir um mecanismo idealizado para entendermos a difusão. No exemplo a seguir, duas barras de materiais metálicos distintos (zinco e cobre) são colocadas em contato e aquecidas por um dado tempo. Nas **Figuras 6.2 a 6.4**, podemos observar o comportamento dos átomos antes das barras serem submetidas a temperaturas elevadas.

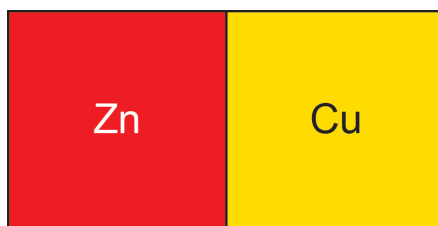


Figura 6.2: Representação de barras de zinco-cobre unidas pela superfície antes de serem submetidas à temperatura elevada.

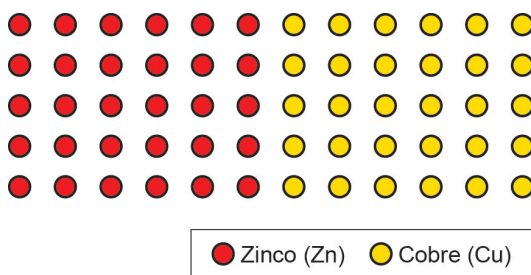


Figura 6.3: Representações esquemáticas das localizações dos átomos de Zn (esquerda) e Cu (direita) no interior das barras.

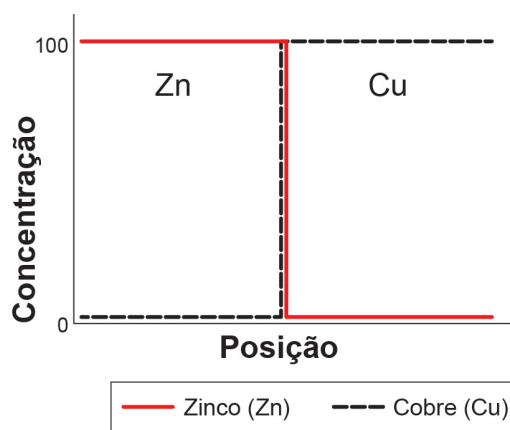


Figura 6.4: Gráfico das concentrações do zinco e do cobre em função da posição ao longo das barras.

Quando o conjunto metálico de zinco e cobre é submetido a um tratamento térmico, no qual a temperatura é elevada por um determinado tempo, ocorre a difusão dos átomos das duas barras, formando uma liga. Nas **Figuras 6.5 a 6.7**, podemos observar o que ocorre após esse

processo, em que os átomos migraram de uma região de maior para uma de menor concentração.

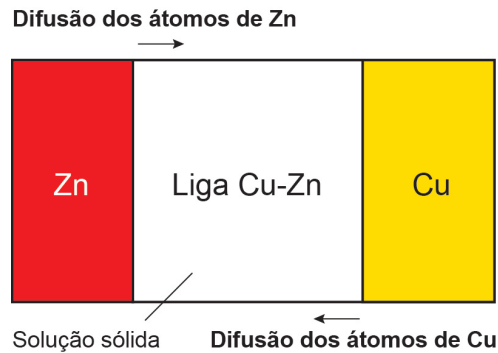


Figura 6.5: Representação das barras zinco-cobre após serem submetidas à temperatura elevada, mostrando a zona de difusão com formação de liga.

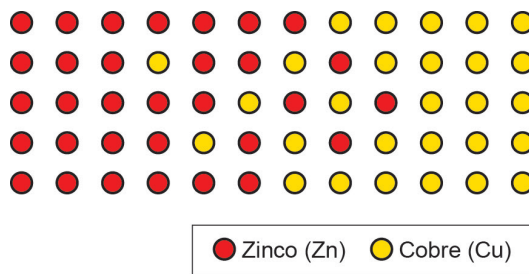


Figura 6.6: Representação esquemática das localizações dos átomos de Zn (círculos vermelhos) e Cu (círculos amarelos) no interior das barras.

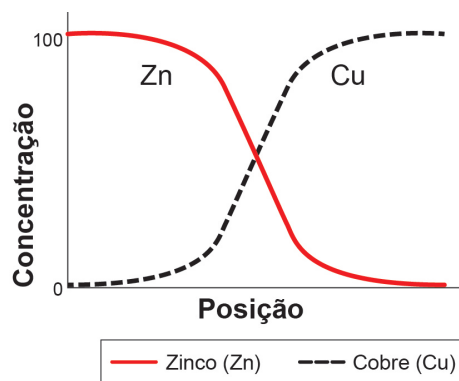


Figura 6.7: Gráfico das concentrações de cobre e zinco em função da posição ao longo das barras, após aquecimento. A linha tracejada representa a concentração de Cu e a linha sólida, a de Zn.

Para ocorrer a movimentação de átomos, são necessárias duas condições:

- deve existir um espaço livre adjacente próximo ao átomo a se difundir;
- o átomo deve possuir energia suficiente, pois precisa quebrar as ligações químicas que o une aos átomos vizinhos, o que causa uma distorção no reticulado cristalino durante seu deslocamento para a nova posição. Além disso, o átomo precisa formar ligações químicas com os átomos de sua nova vizinhança.

Atividade 1

Atende ao objetivo 1

Quais são os principais parâmetros que governam a difusão?

Resposta comentada

A temperatura faz aumentar as vibrações atômicas, ou seja, a energia necessária para fazer o átomo mudar de posição.

A concentração é outro fator, fazendo com que a difusão ocorra no sentido de maior para menor concentração atômica.

Para explicar a difusão em metais, são propostos dois mecanismos: a difusão por lacunas e a intersticial.

- Difusão por lacunas (ou difusão substitucional)

Nesse tipo de difusão, um átomo (hospedeiro ou substitucional) desloca-se de uma posição normal da rede cristalina para um sítio vago (ou lacuna) que esteja próximo.

Essa difusão é limitada em função da concentração de lacunas presente no metal, a qual pode aumentar com a temperatura. Na difusão por lacunas, podemos ter a autodifusão e a interdifusão (**Figuras 6.8 e 6.9**).

- Na autodifusão, os átomos do próprio reticulado se movimentam. Ela ocorre em cristais puros, sem variação na concentração.

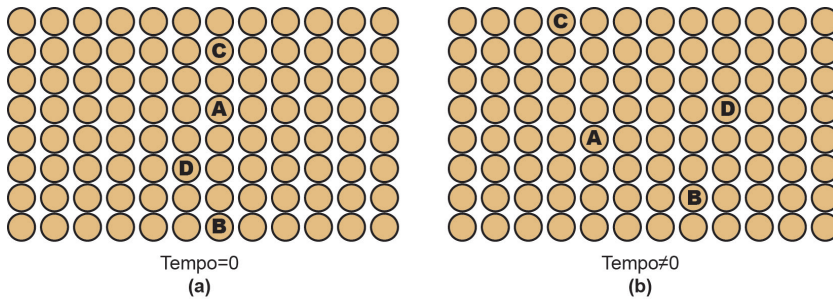


Figura 6.8: Mecanismos de difusão por lacunas: autodifusão. (a) Posição dos átomos em um reticulado cristalino no início da observação. (b) Movimento dos átomos após certo tempo.

- Na interdifusão, átomos de impurezas substitucionais difundem-se, trocando de posição com as lacunas.

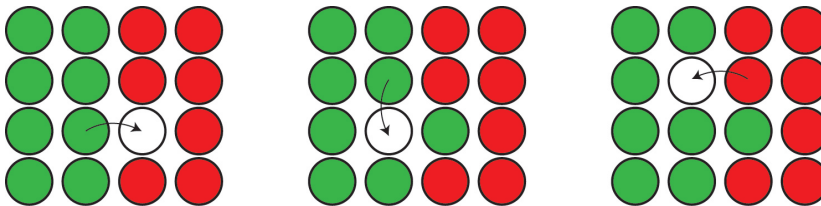


Figura 6.9: Mecanismos de difusão por lacunas: interdifusão

- Difusão intersticial

Nesse tipo de difusão, os átomos migram de uma posição intersticial para outra que esteja vazia (**Figura 6.10a**). Normalmente, a difusão intersticial está associada a átomos pequenos (como hidrogênio, carbono, oxigênio e nitrogênio), que possuem tamanho suficiente para se encaixarem nas posições intersticiais. A movimentação do átomo intersticial causa distorção na rede cristalina, como mostra a **Figura 6.10b**.

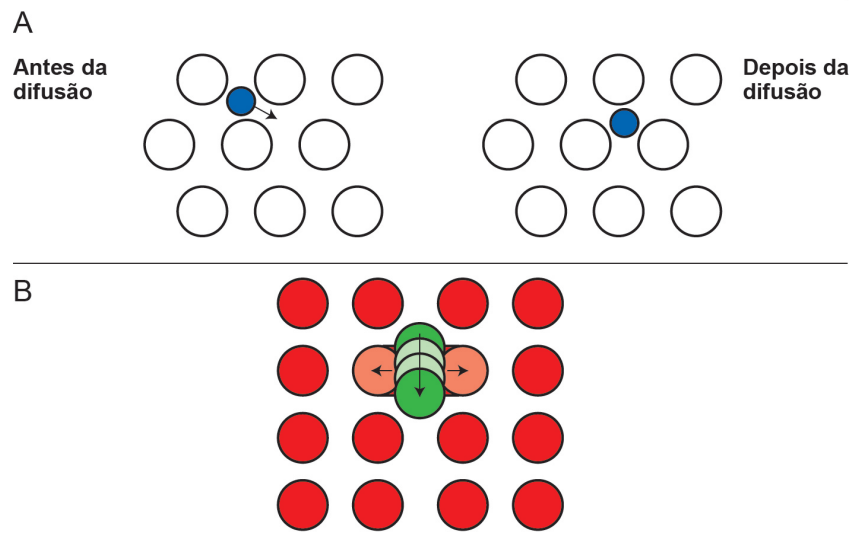


Figura 6.10: Mecanismo de difusão intersticial. (a) movimentação atômica e (b) distorção na rede.

A difusão dos intersticiais ocorre mais rapidamente que a difusão por lacunas, pois:

- os átomos intersticiais possuem maior mobilidade por serem menores;
- existem mais posições intersticiais que lacunas na rede, logo, a probabilidade de movimento intersticial é maior que a difusão de lacunas.

Difusão em regime estacionário

Nesta e na próxima seção, estudaremos a difusão em regime estacionário e não estacionário. Para isso, vamos definir o conceito de fluxo de difusão, que representaremos pela letra J .

O fluxo de difusão (J) quantifica o fenômeno da difusão em função do tempo, ou seja, mensura o quanto de massa (em quilogramas ou em número de átomos) que se difunde por unidade de tempo através de uma área perpendicular à direção do movimento da massa.

$$J = \frac{M}{At}, \text{ ou na forma diferencial: } J = \frac{1}{A} \frac{dM}{dt}, \text{ sendo}$$

$$J \rightarrow \text{fluxo difusional} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right) \text{ ou } \left(\frac{\text{átomos}}{\text{m}^2 \text{s}} \right)$$

$M \rightarrow$ massa que se difunde (kg ou átomos);

$A \rightarrow$ área através da qual a difusão ocorre (m^2);

$t \rightarrow$ tempo (s).

Para entender melhor, vamos considerar duas regiões distintas de átomos (A e B), separadas por um plano de referência (região que separa os dois materiais), mostrada na **Figura 6.11**. Isso significa que, antes do início do processo de difusão, de um lado do plano de referência só existem átomos da espécie A e do outro, apenas átomos da espécie B. Vamos quantificar a variação de concentração dos elementos A e B, após o início da difusão no intervalo Δx . A letra C representa a concentração de átomos de interesse (átomos dos elementos A e B, os quais quantificam a difusão) de cada região em função da posição x .

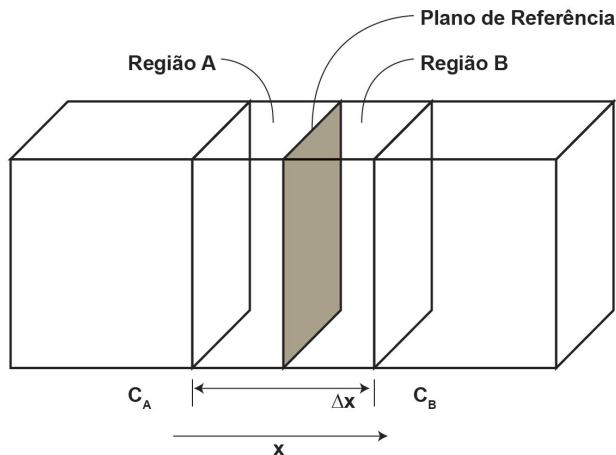


Figura 6.11: Esquema do fluxo de átomos entre duas regiões com concentrações diferentes.

Após o início da difusão, se as concentrações de átomos nas regiões A e B não sofrem alterações com o tempo, o sistema pode ser considerado em regime permanente ou estacionário.

Quando a concentração de átomos de interesse (C) é representada em função da sua posição no interior do sólido, a curva resultante é chamada de perfil de concentrações e a inclinação em um dado ponto dessa curva é o gradiente de concentração (**Figura 6.12**).

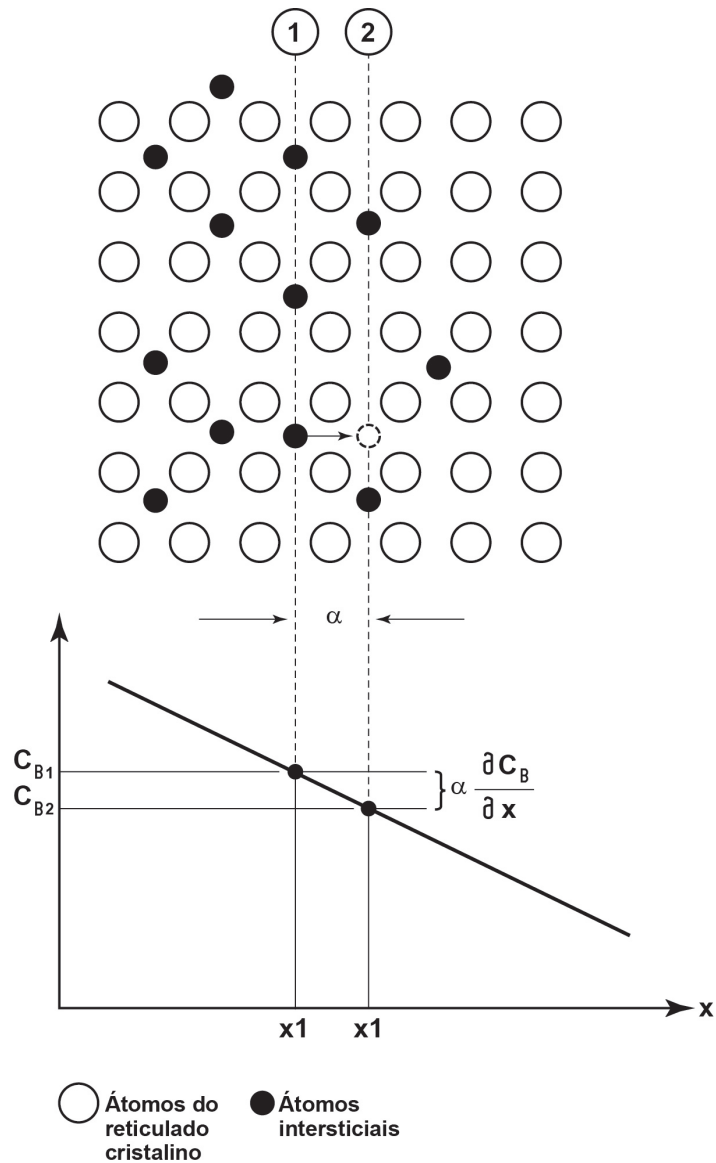


Figura 6.12: Perfil de concentrações para o regime estacionário.

Para calcular o gradiente de concentração, deve-se seguir a fórmula a seguir:

$$\text{gradiente de concentração} = \frac{dC}{dx} = \text{constante}$$

No caso de regime estacionário, o perfil de concentrações é linear (Figura 6.12), logo uma função linear de x :

$$\text{gradiente de concentraç}\sigma = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B}$$

No processo de difusão em regime estacionário em uma única direção, o fluxo (J) é proporcional ao gradiente de concentração. Tal fato é conhecido pela 1ª Lei de Fick.

$$J = -D \frac{dC}{dx},$$

sendo

$D \rightarrow$ coeficiente de difusão (m^2/s), e o sinal negativo, indicador que a direção de difusão é contrária ao gradiente;

$\frac{dC}{dx} \rightarrow$ gradiente de concentração.

Na 1ª Lei de Fick, o gradiente de concentração é o *potencial termodinâmico ou força motriz* (*driving force*) para que ocorra o fenômeno de difusão.

Vamos exemplificar uma aplicação da 1ª Lei de Fick:

Uma placa de ferro é exposta a 700 °C a uma atmosfera rica em carbono (carbonetante) em um dos seus lados e uma atmosfera deficiente em carbono (descarbonetante) no outro lado.

Vamos calcular o fluxo difusional do carbono através da placa considerando que:

- o regime estacionário foi atingido;
- as concentrações de carbono nas posições a 5 e a 10 mm abaixo da superfície carbonetante sejam de 1,2 e 0,8 kg/m³, respectivamente;
- o coeficiente de difusão de $3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ nessa temperatura.

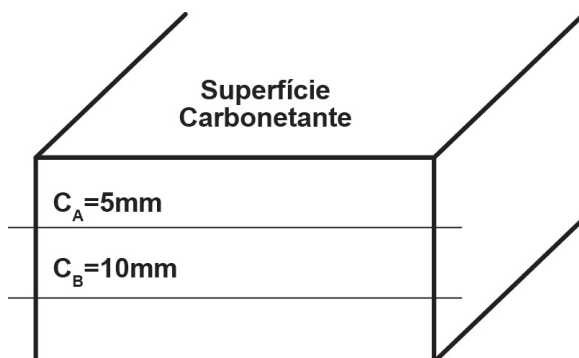


Figura 6.13: Placa de ferro exposta a uma superfície carbonetante.

$$J = -D \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B}$$

$$J = -\left(3 \times 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{s}\right) \frac{(1,2 - 0,8) \text{ kg} / \text{m}^3}{(0,005 - 0,01) \text{ m}}$$

$$J = \frac{2,4 \times 10^{-9} \text{ kg}}{\text{m}^2 \text{ s}}.$$

O coeficiente de difusão é uma constante que dá a indicação da taxa na qual os átomos se difundem. Ele depende:

- da natureza dos átomos em questão;
- do tipo de estrutura cristalina e
- da temperatura.

A temperatura tem a maior influência sobre o coeficiente de difusão, e essa dependência é quantificada na relação:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q_d}{RT}\right),$$

sendo

$D_0 \rightarrow$ constante independente da temperatura (m^2/s);

$Q_d \rightarrow$ energia de ativação para a difusão (J/mol ou eV/átomo);

$R \rightarrow$ constante dos gases ($8,31 \text{ J/mol K}$ ou $8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/átomo K}$);

$T \rightarrow$ temperatura absoluta (K).

A energia de ativação é a energia necessária para produzir o movimento difusivo de um mol de átomos. A **Tabela 6.1** mostra valores de alguns elementos para cálculo do coeficiente de difusão.

Tabela 6.1: Dados para cálculo de coeficiente de difusão.

Espécie difusível	Metal hospedeiro	D_0 (m ² /s)	Energia de ativação Q_D		Valores calculados	
			KJ/mol	eV/átomo	T (°C)	D (m ² /s)
Fe	Fe - α (CCC)	$2,8 \times 10^{-4}$	251	2,60	500	$3,0 \times 10^{-21}$
					900	$1,8 \times 10^{-15}$
Fe	Fe- γ (CFC)	$5,0 \times 10^{-5}$	284	2,94	900	$1,1 \times 10^{-17}$
					1100	$7,8 \times 10^{-16}$
C	Fe - α	$6,2 \times 10^{-7}$	80	0,83	500	$2,4 \times 10^{-12}$
					900	$1,7 \times 10^{-10}$
C	Fe- γ	$2,3 \times 10^{-5}$	148	1,53	900	$5,9 \times 10^{-12}$
					1100	$5,3 \times 10^{-11}$
Cu	Cu	$7,8 \times 10^{-5}$	211	2,19	500	$4,2 \times 10^{-19}$
Zn	Cu	$2,4 \times 10^{-5}$	189	1,96	500	$4,0 \times 10^{-18}$
Al	Al	$2,3 \times 10^{-4}$	144	1,49	500	$4,2 \times 10^{-14}$
Cu	Al	$6,5 \times 10^{-5}$	136	1,41	500	$4,1 \times 10^{-14}$
Mg	Al	$1,2 \times 10^{-4}$	131	1,35	500	$1,9 \times 10^{-23}$
Cu	Ni	$2,7 \times 10^{-5}$	256	2,65	500	$1,3 \times 10^{-22}$

Atividade 2

Atende ao objetivo 2

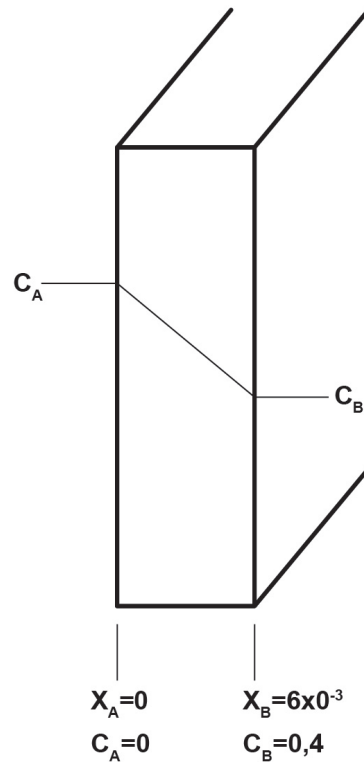
A purificação do hidrogênio pode ser feita por difusão do gás através de uma chapa de paládio a 600 °C. Calcule a quantidade de hidrogênio que passa por hora através de uma chapa de 6 mm de espessura e área de 0,25 m² a 600 °C, considerando:

- o coeficiente de difusão do hidrogênio = $1,7 \times 10^{-8}$ m²/s;
- $C = 2$ e 0,4 kg/m³ (cada lado da chapa); e
- o regime estacionário.

Resposta comentada:

Calcular a quantidade de hidrogênio é o mesmo que calcular o fluxo de hidrogênio através da placa, conforme a descrição do desenho a seguir.

Placa de paládio de 6mm



$$J = -D \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B}$$

$$J = -1,7 \times 10^{-8} \left(\frac{2 - 0,4}{0 - 6 \times 10^{-3}} \right)$$

$$J = 4,53 \times 10^{-10} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Difusão em regime não estacionário

Difusão em regime não estacionário é quando o fluxo de difusão e o gradiente de concentração, em um ponto específico no interior de um sólido, variam ao longo do tempo. Esse tipo de difusão em condições de estado não estacionário ocorre na maioria das situações práticas. A **Figura 6.14** mostra o perfil de concentração em tempos diferentes.

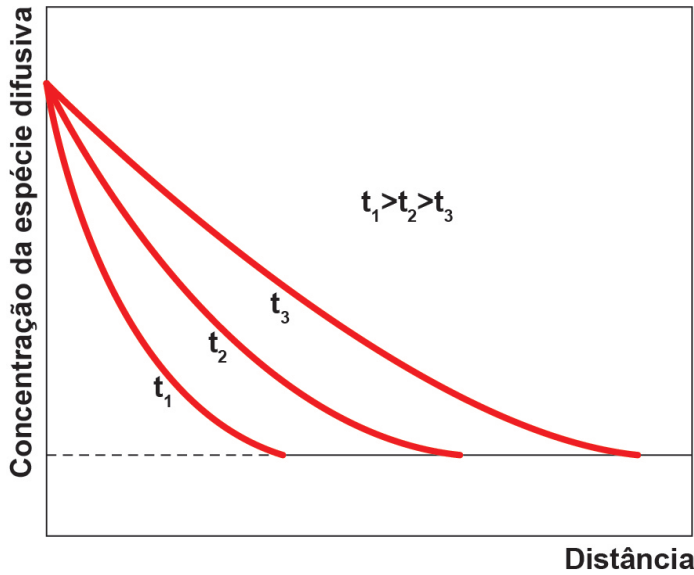


Figura 6.14: Perfil de concentração na difusão em regime não estacionário.

Podemos observar na **Figura 6.14** que para uma mesma posição (distância), a concentração da espécie difusiva muda com o passar do tempo. Isso é diferente do que acontecia na difusão em estado estacionário, quando a concentração de uma espécie difusiva em uma dada posição não muda com o passar do tempo.

Como a concentração de uma espécie difusiva é dependente da posição e do tempo, então a seguinte equação é válida e conhecida como 2ª Lei de Fick.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Essa equação pode ser simplificada para o caso do coeficiente de difusão (D) for independente da composição (concentração do elemento em difusão).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left(D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right), \text{ em que:}$$

$D \rightarrow$ coeficiente de difusão (m^2/s);

$\frac{d^2 C}{dx^2} \rightarrow$ gradiente de concentração em função da posição;

$\frac{dC}{dt} \rightarrow$ gradiente de concentração em função do tempo.

Quando estudamos a difusão em estado estacionário, a concentração do elemento em difusão dependia apenas da posição, fazendo com que a solução fosse uma equação linear de fácil solução. Mas em equações de duas variáveis, em que a concentração da espécie em difusão depende do tempo e da posição, condições de contorno devem ser estabelecidas para solucioná-la. Conhecidas as condições de contorno, é possível obter soluções para essa expressão, ou seja, descobrir a concentração em termos tanto da posição quanto do tempo.

Sólido semi-infinito

Sólido em 2D no qual a variação de uma variável (no nosso caso a concentração do elemento em difusão) em uma das faces nunca atinge a outra extremidade. Qualquer sólido com dimensões “finitas” pode ser “aproximado” como um sólido semi-infinito desde que atenda essa condição.

Podemos dar um exemplo de um **sólido semi-infinito**, em que a concentração na superfície é mantida constante. Tal concentração constante pode ser obtida quando a fonte da espécie difusível está em fase gasosa. As condições de contorno estabelecidas nesse caso são:

- Antes do início da difusão, os átomos do soluto em difusão que estejam presentes no material estão uniformemente distribuídos mantendo uma concentração C_0 .
- O valor de x na superfície é zero e aumenta com a distância para dentro do sólido.
- O tempo zero é tomado como sendo o instante imediatamente anterior ao início do processo de difusão, ou seja:
- para $t = 0$, $C = C_0$ para $0 \leq x < \infty$;
- para $t > 0$, $C = C_s$ (concentração da superfície deverá ser constante) para $x = 0$, $C = C_0$ para $x = \infty$.
- Quando aplicamos essa condição à 2ª Lei de Fick, temos a seguinte solução:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right), \text{ sendo}$$

$C_x \rightarrow$ concentração em uma profundidade x após decorrido um tempo t ;

$C_s \rightarrow$ concentração na superfície que é mantida constante;

$C_0 \rightarrow$ concentração inicial antes do início da difusão;

$D \rightarrow$ coeficiente de difusão;

Erf \rightarrow função erro de Gauss, cujos valores são dados em tabelas matemáticas. Alguns desses valores aparecem na **Tabela 6.2**.

Tabela 6.2: Valores da função erro de Gauss

Z	erf(z)	Z	erf(z)	Z	erf(z)
0	0	0,55	0,5633	1,3	0,9340
0,025	0,0282	0,6	0,6039	1,4	0,9523
0,05	0,564	0,65	0,6420	1,5	0,9661
0,1	0,1125	0,7	0,6778	1,6	0,9763
0,15	0,1680	0,75	0,7112	1,7	0,9838
0,20	0,2227	0,8	0,7421	1,8	0,9891
0,25	0,2763	0,85	0,7707	1,9	0,9928
0,3	0,3286	0,9	0,7970	2,0	0,9953
0,35	0,3794	0,95	0,8209	2,2	0,9981
0,4	0,4284	1,0	0,8427	2,4	0,9993
0,45	0,4755	1,1	0,8802	2,6	0,9998
0,5	0,5205	1,2	0,9103	2,8	0,9999

Um exemplo mais prático seria o processo para endurecer a superfície de um aço, em que um tratamento termoquímico conhecido por cementação é utilizado. Nesse tratamento, um aço com baixo carbono é colocado em um ambiente rico em carbono (com alta concentração de carbono) para que o carbono se difunda para o interior do aço.

Em um processo de cementação gasosa (ambiente rico em carbono em fase gasosa), qual deve ser o tempo de cementação para atingir um teor de carbono de 0,8% na posição de 0,5 mm abaixo da superfície, considerando que:

- foi utilizado um aço com 0,25 % de carbono a 950 °C;
- a concentração de carbono na superfície externa é de 1,2%; e
- o coeficiente de difusão do carbono no ferro a 950 °C é de $1,6 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$?
- Primeiramente vamos estabelecer as condições de contorno:
- $C_0 = 0,25\%C$;
- $C_s = 1,2\%C$;
- $C_x = 0,8\%C$, sendo $x = 0,5 \text{ mm}$ ou $5 \times 10^{-4} \text{ m}$.

Aplicando a equação da concentração em função da posição e do tempo, temos:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = \frac{0,8 - 0,25}{1,2 - 0,25} = 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{5 \times 10^{-4}}{2\sqrt{1,6 \times 10^{-11} t}} \right]$$

$$0,4210 = \operatorname{erf} \left(\frac{62,5}{\sqrt{t}} \right).$$

Qual é o problema agora? Precisamos determinar o valor de z cuja função erro é 0,4210. Observando a **Tabela 6.2**, temos os seguintes dados:

Z	Erf(z)
0,35	0,3794
Z	0,4210
0,4	0,4284

Como o valor da função erro que encontramos (0,4210) não é tabelado, precisamos fazer uma interpolação entre os valores mais próximos.

$$\frac{z - 0,35}{0,4 - 0,35} = \frac{0,4210 - 0,3794}{0,4284 - 0,3794}$$

$$z = 0,392.$$

Então:

$$\frac{62,5}{\sqrt{t}} = 0,392$$

$$t = 25400s \text{ ou } 7,1h.$$



Fazendo uma interpolação linear

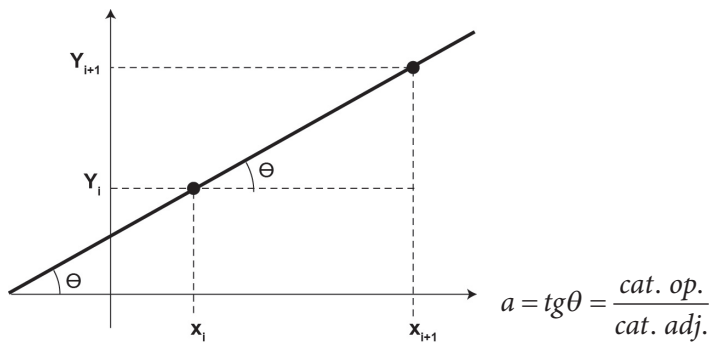
Interpolação linear é a capacidade de deduzir um valor entre dois valores explicitamente anunciados em uma tabela ou gráfico linear.

Matematicamente, é o processo de estimar valores de uma função f para valores de x diferentes de x_i , para $i = 0, \dots, n$, sabendo-se apenas os valores de $f(x)$ nos pontos x_0, x_1, \dots, x_n (exatamente o que acontece com a tabela da função erro de Gauss – erf).

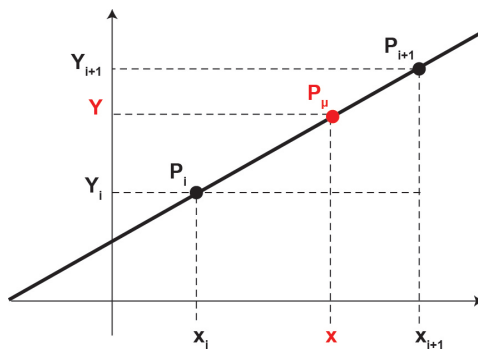
A partir disso, teremos a equação da reta, que nos ajudará a encontrar o valor desejado:

$$a = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}$$

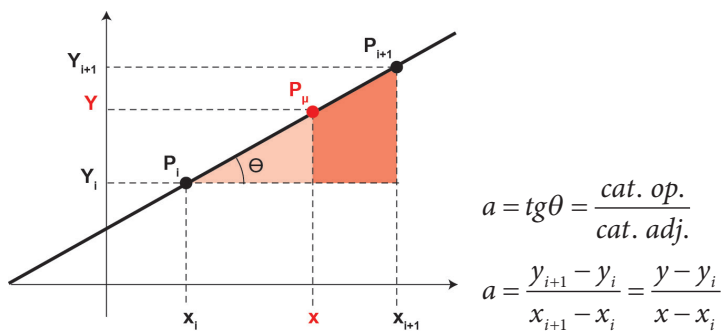
a = coeficiente angular = inclinação da reta = $\tan \theta$



Queremos determinar um valor intermediário entre dois pontos conhecidos.



Podemos encontrar esse valor por semelhança de triângulos.



Atividade 3

Atende ao objetivo 3

Pretende-se cementar um aço com 0,1 %C, mantendo-o em uma atmosfera com 1,2 %C em alta temperatura, até que se atinja 0,45 %C em uma profundidade de 2 mm abaixo da superfície. Qual será o tempo total de cementação se o coeficiente de difusão for $D = 2 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$?

Resposta comentada

No enunciado da questão, não se fala em regime estacionário. De fato, no caso da cementação, não se obtém um gradiente de concentração linear, portanto estamos em presença de um regime não estacionário. Sendo assim, a fim de resolver o problema, é necessário empregar a 2ª Lei de Fick.

Primeiramente, vamos estabelecer as condições de contorno:

$$C_0 = 0,1 \text{ \%C};$$

$$C_s = 1,2 \text{ \%C};$$

$$C_x = 0,45 \text{ \%C}, \text{ sendo } x = 2 \text{ mm ou } 2 \times 10^{-3} \text{ m}.$$

Aplicando a equação da concentração em função da posição e do tempo, temos:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = \frac{0,45 - 0,1}{1,2 - 0,1} = 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right]$$

$$0,318 = 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right]$$

$$0,318 - 1 = -\operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right]$$

$$-0,682 = -\operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right]$$

$$0,682 = \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right].$$

Sabemos agora que a função erro, ou $\text{erf}(z)$, em que $z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$, vale 0,682.

Utilizando a tabela da função erro, podemos determinar o valor de z .

Z	Erf(z)
0,70	0,6778
Z	0,682
0,75	0,7112

Como o nosso valor da função erro não é tabelado, precisamos fazer uma interpolação entre os valores mais próximos.

$$\frac{z - 0,7}{0,75 - 0,7} = \frac{0,682 - 0,6778}{0,7112 - 0,6778}$$

$$z = 0,7062$$

Então:

$$z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

$$0,7062 = \frac{2 \times 10^{-3}}{2\sqrt{2 \times 10^{-11} t}}$$

Vamos elevar ao quadrado os dois lados da equação, a fim de remover a raiz quadrada e liberar a incógnita t :

$$(0,7062)^2 = \left(\frac{2 \times 10^{-3}}{2\sqrt{2 \times 10^{-11} t}} \right)^2$$

$$0,4987 = \frac{10^{-6}}{2 \times 10^{-11} t}$$

$$t = 100261 \text{ segundos} = 27,85 \text{ horas}$$

Conclusão

O estudo da difusão atômica é de grande importância em ciência dos materiais, uma vez que toda mudança de microestrutura só acontece se os átomos se movimentarem. E, como estudamos em aulas passadas, as propriedades dos materiais estão diretamente relacionadas à sua microestrutura.

Resumo

- Difusão atômica é um processo de movimento aleatório de átomos quando termicamente ativado.
- Acima da temperatura de zero absoluto, os átomos vibram, e essa vibração aumenta com o aumento da temperatura.
- A equação de *Arrhenius* associa a taxa de movimentação dos átomos com a temperatura.
- Os átomos se movimentam da região de maior para a de menor concentração, caso haja espaço livre próximo e energia suficiente para quebrar as ligações químicas.
- A difusão em metais pode ocorrer por lacunas (difusão substitucional) ou por interstícios (difusão intersticial).
- O fluxo de difusão (quantidade de átomos por metro quadrado por segundo) pode ocorrer em regime estacionário ou não estacionário.
- Em regime estacionário, o gradiente de concentração não varia com o tempo (1ª Lei de Fick).
- Segundo a 1ª Lei de Fick, a força motriz para ocorrer a difusão é o gradiente de concentração.
- Em regime não estacionário, o fluxo de difusão e o gradiente de concentração variam com o tempo (2ª Lei de Fick).

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, estudaremos os mecanismos de deformação plástica e de endurecimento em metais.

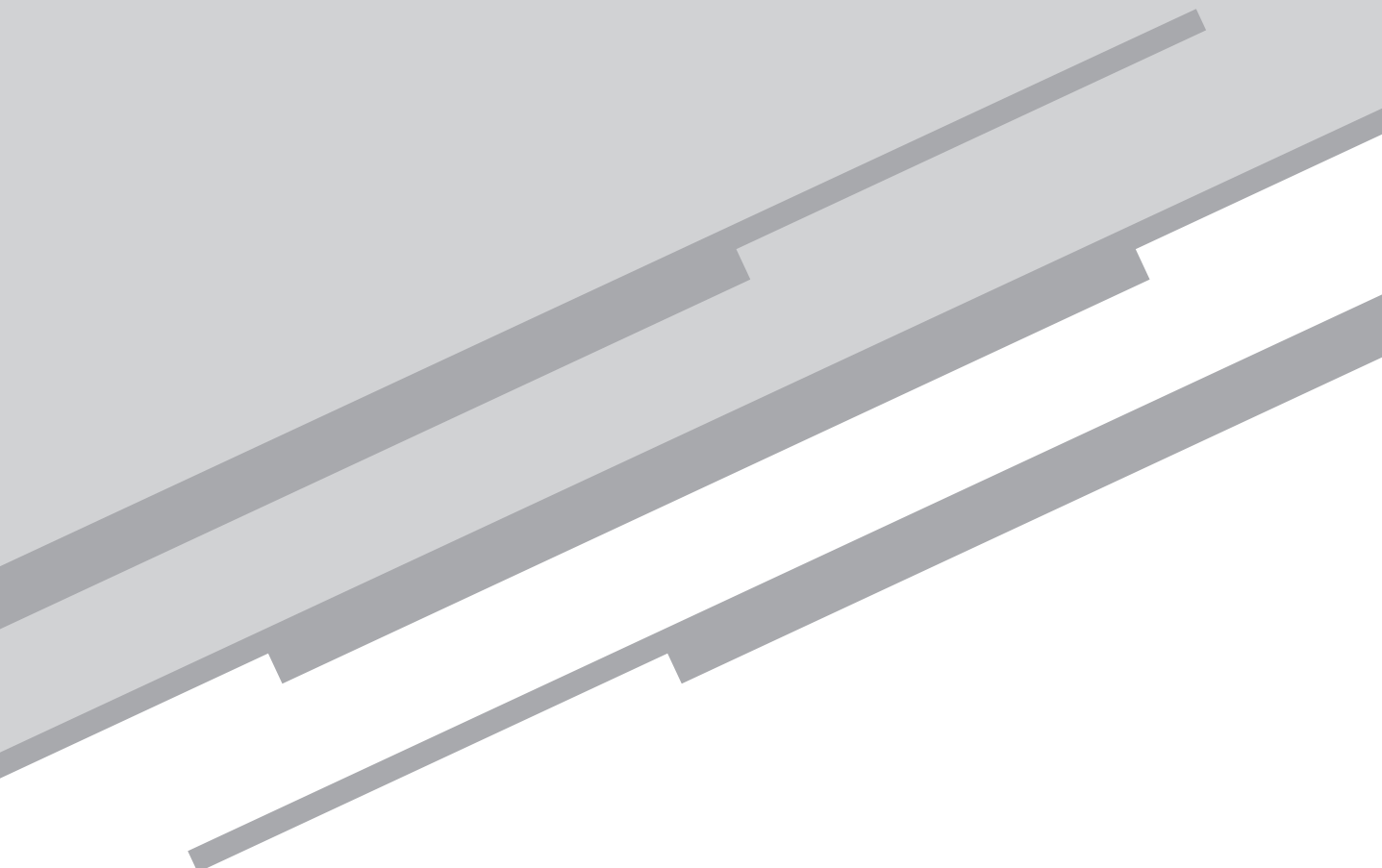
Referências

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

VAN VLACK, Laurence. *Princípios de ciência e tecnologia dos materiais*. Rio de Janeiro: Campos, 1994.

Aula 7

Mecanismos de deformação
plástica e de endurecimento



Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila

Meta

Apresentar os conceitos relacionados aos mecanismos de deformação plástica dos metais.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

- identificar as características físicas relacionadas ao processo de deformação plástica em metais;
- diferenciar os mecanismos de aumento de resistência dos metais.

Introdução

Já estudamos em aulas anteriores o conceito de deformação plástica, que é definida como a deformação permanente dos materiais. Mas por que é importante conhecermos o modo como um material deforma?

O entendimento sobre a deformação plástica é muito utilizado e é de extrema importância para o setor industrial. É através desse mecanismo que damos forma a objetos utilizados no nosso dia a dia, por exemplo, uma chapa de aço pode virar a carroceria de um carro ou uma chapa de alumínio em latas de refrigerante.

A deformação plástica pode ocorrer em diversos materiais, desde polímeros até metais. Nesta aula, vamos estudar o fenômeno físico que leva os metais a se deformarem. Vocês podem estar se perguntando: por que estudar especificamente a deformação plástica em metais?

O mecanismo de deformação plástica é diferente para materiais amorfos e cristalinos. Nos amorfos, a deformação consiste no escoamento viscoso, como ocorre nos polímeros. Já nos materiais cristalinos, o principal mecanismo de deformação plástica geralmente consiste no escorregamento de planos atômicos através da movimentação de discordância, o que será discutido nesta aula.

Os metais, ligas e cerâmicas (com exceção do vidro) são materiais cristalinos. Devido às ligações químicas fortes (ligações iônicas e covalentes) e às características das estruturas cristalinas, as discordâncias das cerâmicas são praticamente imóveis. Esse fato explica a sua fragilidade, ou seja, as cerâmicas são resistentes, suportando altas tensões, mas são frágeis, já que não se deformam plasticamente antes da ruptura.

Conhecer como os metais se deformam plasticamente nos possibilita conhecer o quanto são resistentes e o quanto são frágeis. Em muitas aplicações, há a necessidade de o metal ser resistente e não se deformar plasticamente, como ocorre, por exemplo, em estruturas para pontes. Na segunda parte desta aula, vamos estudar quais os mecanismos para aumento da resistência dos metais.

Mecanismo de deformação plástica

Quando a tensão aplicada sobre um determinado corpo supera a tensão de escoamento, iniciam-se as rupturas das ligações químicas e os movimentos atômicos no interior dos materiais. Como vimos em aulas

passadas, a deformação plástica é permanente e não modifica o reticulado atômico (estrutura cristalina), já que os movimentos são sempre de um número inteiro de parâmetros de rede. Isso significa que os átomos ao se movimentarem não param em um interstício e sim em uma posição ocupada por outro átomo. Além disso, um material inicialmente cúbico de corpo centrado (CCC) continuará CCC após a deformação.

Como os átomos tendem a rolar uns sobre os outros, são os esforços de cisalhamento os responsáveis pelos movimentos atômicos. Tais esforços são uma resultante dos esforços externos aplicados para promover a deformação plástica. Por isso, mesmo que os esforços externos sejam de tração ou compressão, as tensões responsáveis pela deformação plástica serão as de cisalhamento.

Movimento das discordâncias

O principal mecanismo de deformação plástica é o movimento das discordâncias. Podemos entender como ocorre esse movimento da discordância analisando a **Figura 7.1**.

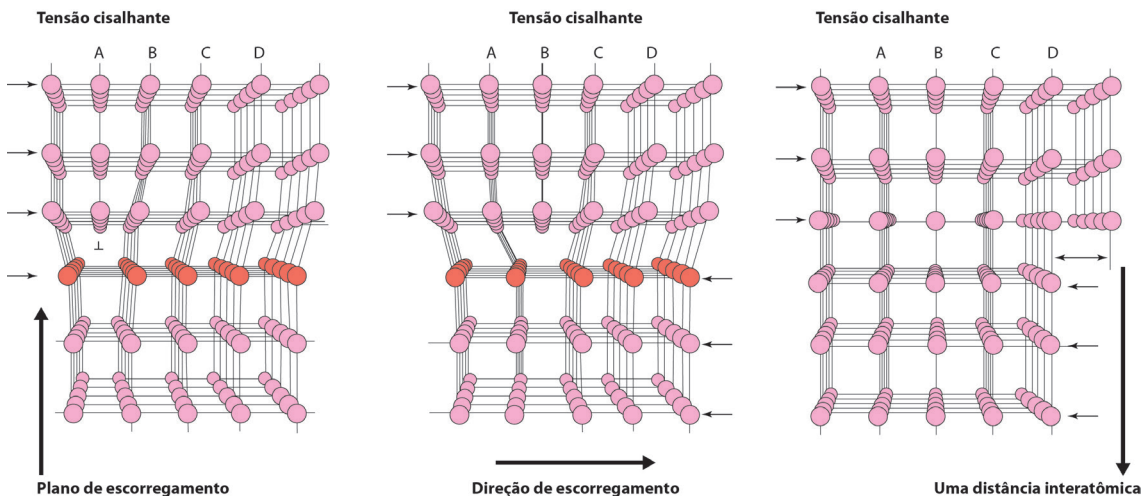


Figura 7.1: Desenho esquemático da movimentação das discordâncias. (a) Inicialmente no plano A. (b) Posteriormente no plano B

Na **Figura 7.1 a**, temos um reticulado cristalino do tipo cúbico simples com uma discordância no plano A. Para que essa discordância se movimente é preciso:

- *Uma tensão cisalhante mínima.* Essa tensão é a responsável pela “quebra” da ligação química.

- Uma direção preferencial para o deslocamento da discordância. A discordância não se movimenta em qualquer direção, e esse fato está diretamente relacionado às densidades dos planos e direções em cada estrutura cristalina. Na **Figura 7.1 a e b**, estão indicados o plano e a direção de escorregamento.

Na **Figura 7.1 b**, a discordância se movimentou para o plano B. Mas o que aconteceu para a discordância passar do plano A para o plano B?

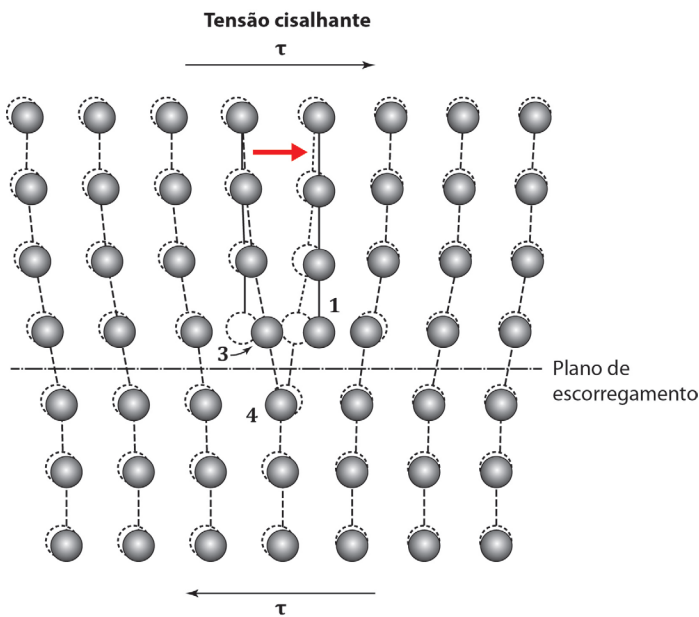


Figura 7.2: Esquema ilustrativo do rearranjo atômico nas vizinhanças de uma discordância em cunha, sob a ação de uma tensão cisalhante.

Se observarmos a **Figura 7.2**, veremos que a discordância se encontrava no plano em que está o átomo 3. Com a tensão cisalhante, a ligação existente entre os átomos 1 e 4 se desfaz. Então, agora, a ligação refeita é entre os átomos 3 e 4. A discordância passou a existir no plano adjacente. Esse processo continua até que:

- a tensão não seja mais suficiente para quebra de ligações;
- essa discordância encontre outra discordância;
- essa discordância encontre um contorno de grão;
- essa discordância encontre a superfície do material (**Figura 7.1 c**).

Para que haja a deformação plástica, uma grande quantidade de discordâncias precisa se movimentar. O movimento de uma discordância acontece de forma discreta, ou seja, há pequenos deslocamentos por vez.

Sistemas de escorregamento

O processo pelo qual uma discordância se move para causar uma deformação no material é chamado de *escorregamento*. O plano cristalográfico ao longo do qual a linha de discordância se movimenta é chamado de *plano de escorregamento*.

Dentro de um plano, há direções que são preferenciais, nas quais ocorrerá mais facilmente o escorregamento. Essa combinação é chamada de sistemas de escorregamento e está diretamente relacionada à densidade atômica desses planos e direções. O escorregamento ocorre mais facilmente em planos e direções mais densos, porque os átomos estão mais próximos e a energia necessária para a ocorrência desse processo é menor. Na **Figura 7.3**, podemos observar uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), na qual o plano (1 1 1) é o mais denso. Nele, temos três direções preferenciais para o escorregamento.

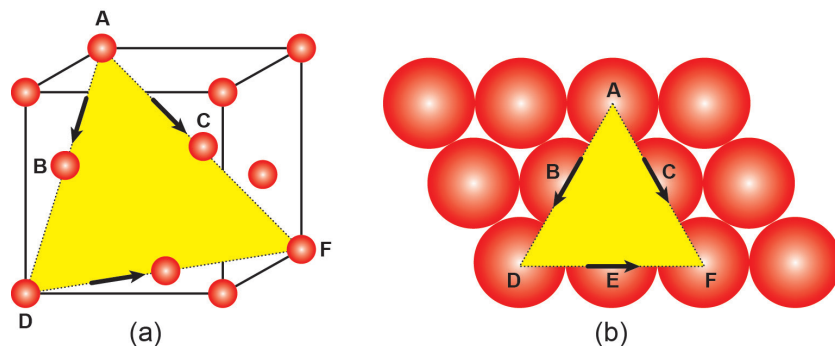


Figura 7.3: Sistema de escorregamento da estrutura cúbica de face centrada (CFC). (a) Estrutura cristalina CFC com destaque para o plano (111) e as direções mais compactas desse plano. (b) Destaque do plano (111) em duas dimensões para a estrutura CFC.

Na **Tabela 7.1**, podemos observar os sistemas de deslizamentos das estruturas CFC, CCC, hexagonal compacta (HC).

Tabela 7.1: Sistemas de escorregamento dos metais

Metal	Plano de escorregamento	Direção de escorregamento	Nº de sistemas de deslizamento
CFC – cúbico de face centrado			
Cu, Al, Ni, Ag, Au	{111}	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	12
CCC – cúbico de corpo centrado			
Fe (α), W, Mo	{110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
Fe (α), W	{211}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
Fe (α), K	{321}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24
HC – hexagonal compacto			
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	{0001}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	3
Ti, Mg	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	6

O número de sistemas de escorregamento está relacionado à facilidade de movimento de discordâncias e, consequentemente, à facilidade de deformação plástica. Por isso, metais com estruturas do tipo CFC e CCC são dúcteis, e metais com estrutura HC são frágeis.

Os metais com estrutura CFC se deformam mais plasticamente do que os com estrutura CCC. Isso acontece porque apesar de alguns metais CCC possuírem mais sistemas de escorregamento (Fe α , por exemplo) do que os metais com estrutura CFC, os sistemas deste último são mais densos do que os sistemas da estrutura do primeiro. Intuitivamente, podemos confirmar essa afirmação se imaginarmos que para deformar o alumínio precisamos de uma força menor do que a necessária para deformar o ferro.

Esforços envolvidos

Quais são as tensões envolvidas na existência de uma discordância? E quais são as tensões necessárias para movimentá-las?

Tração e compressão ao redor da discordância

A existência de uma discordância dentro da estrutura cristalina gera uma região de tensões compressivas e trativas em torno da discordância. Podemos observar esse fato na **Figura 7.4 a**.

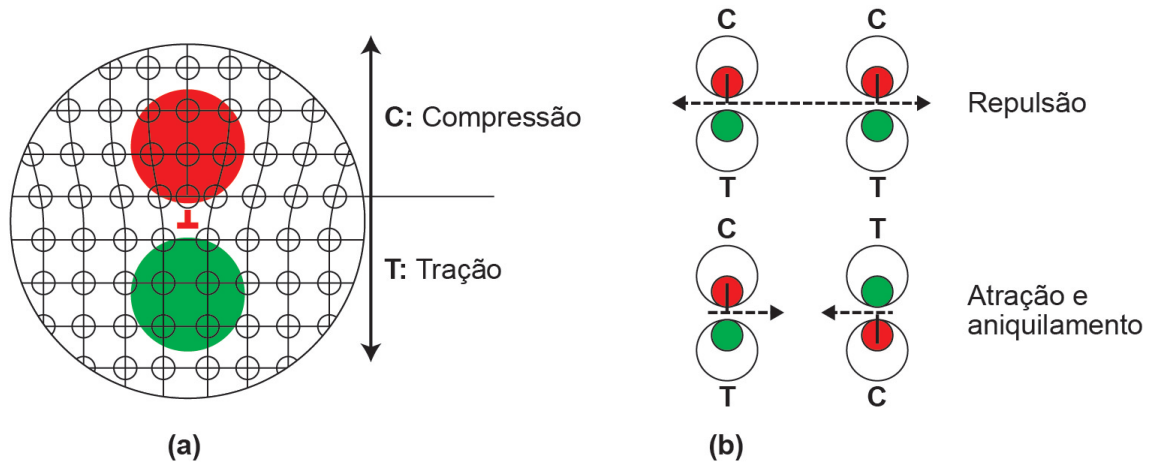


Figura 7.4: (a) Região de tração e compressão ao redor da discordância. (b) Interação entre as discordâncias.

Na **Figura 7.4 a**, a região compressiva existe pelo fato de a discordância ser um semiplano extra de átomos dentro do reticulado. Para os átomos ocuparem essa região, os átomos adjacentes e acima da linha de discordância precisam se comprimir. Isso significa que os átomos próximos às discordâncias estão sofrendo uma deformação compressiva em relação aos do reticulado perfeito. Na região abaixo da linha de discordância, o efeito é o oposto, e os átomos sofrem uma deformação trativa.

Esses esforços trativos e compressivos geram uma interação entre as discordâncias. Na **Figura 7.4 b**, podemos observar que, quando duas discordâncias se deslocam em uma mesma direção, elas podem:

- se *repelir* se as duas possuírem a região compressiva no mesmo sentido;
- se *atrair* e, conseqüentemente, se aniquilar (deixam de ser uma discordância e passam a ser um plano do reticulado), se possuírem a região compressiva em sentidos opostos.

Cisalhamento para movimento da discordância

Para que haja o rompimento das ligações químicas e assim ocorra o movimento das discordâncias, é necessária uma tensão cisalhante atuando no sentido de movimentação da discordância (plano de escorregamento). Chamaremos essa tensão de *Tensão cisalhante resolvida* (τ_R).

Para entendermos a atuação dessa tensão, vamos considerar um monocristal. Por que um monocristal? Os monocristais apresentam apenas um grão com uma única orientação dos átomos. Já os policristais são vários grãos com orientações atômicas diferentes.



Nos monocristais, há um único cristal e uma única orientação dos átomos.

Nos policristais, há vários grãos com orientações atômicas diferentes.

Na **Figura 7.5**, podemos observar a representação de um corpo cilíndrico monocristalino que está sendo tracionado pela aplicação de força em sua extremidade. Em destaque, temos um plano de escorregamento da discordância (esse plano possui uma área A_R). Nele é mostrada a direção preferencial para o deslocamento. Repare que existem dois ângulos representados na figura λ e ϕ .

- λ representa o ângulo entre a força externa aplicada no corpo (F) e a direção de deslocamento da discordância;
- ϕ representa o ângulo entre a força externa aplicada no corpo (F) e a direção normal do plano de deslocamento da discordância.

A força atuando no deslocamento da discordância possui a mesma direção e sentido da direção de escorregamento da discordância e é representada por F_R .

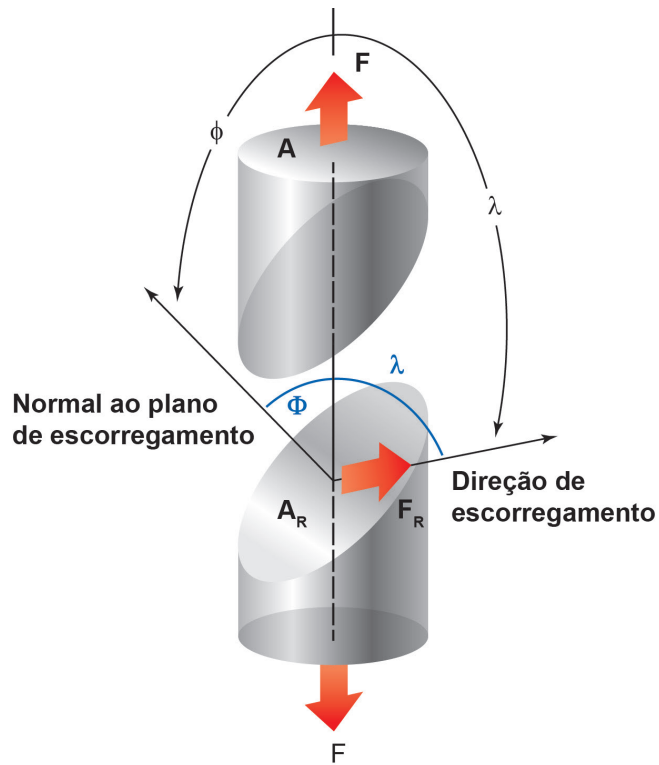


Figura 7.5: Representação do plano de escorregamento de um monocristal.

A força F_R e a área A_R são componentes das forças F e da área A em função dos ângulos λ e ϕ . Por decomposição, temos que:

$$F_R = F \cos \lambda$$

$$A_R = \frac{A}{\cos \phi}$$

$$\tau_R = \frac{F_R}{A_R} = \frac{F \cos \lambda}{\frac{A}{\cos \phi}}$$

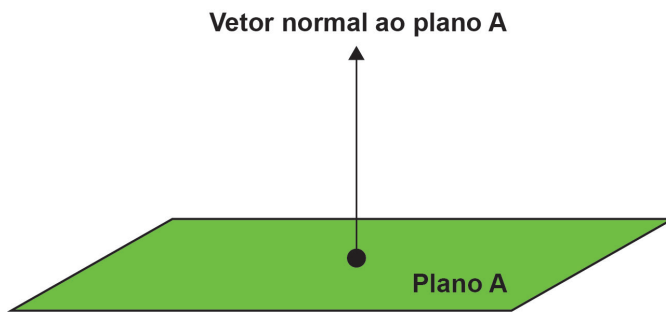
$$\tau_R = \sigma \cos \phi \cos \lambda$$

sendo

σ = a tensão externa aplicada gerada pela força aplicada na área A .



Define-se um *vetor normal a um plano* como sendo um vetor cuja direção é ortogonal, ou seja, que forme 90° com qualquer reta pertencente a esse plano.



Temos que saber que não é qualquer tensão cisalhante que faz uma discordância se movimentar (escorregar): existe uma tensão mínima necessária, chamada de *Tensão de cisalhamento resolvida crítica* (τ_{RC}). Essa é uma característica própria do material, uma vez que o movimento das discordâncias está relacionado à deformação plástica do material, e a deformação plástica só ocorre quando atingimos o limite de escoamento do material (σ_e).

$$F_R = F \cos \lambda$$

$$\tau_R (\max) = \tau_{RC} \sigma (\cos \phi \cos \lambda)_{\max}$$

$$\sigma = \sigma_e = \frac{\tau_{RC}}{(\cos \phi \cos \lambda)_{\max}}$$

A tensão resolvida será máxima quando o plano e a direção de escorregamento estão orientados de forma que $\lambda = \phi = 45^\circ$.

$$\sigma_e = \frac{\tau_{RC}}{\cos 45 \cos 45} = \frac{\tau_{RC}}{0,5}$$

$$\sigma_e = 2\tau_{RC}$$

Exemplo: Considere um monocristal de Fe CCC orientado com uma tensão externa aplicada na direção $[0\ 1\ 0]$. Vamos calcular a tensão ci-

salhante resolvida ao longo do plano $(1\ 1\ 0)$ e na direção $[\bar{1}11]$ quando uma tensão externa de tração σ de 52 Mpa é aplicada.

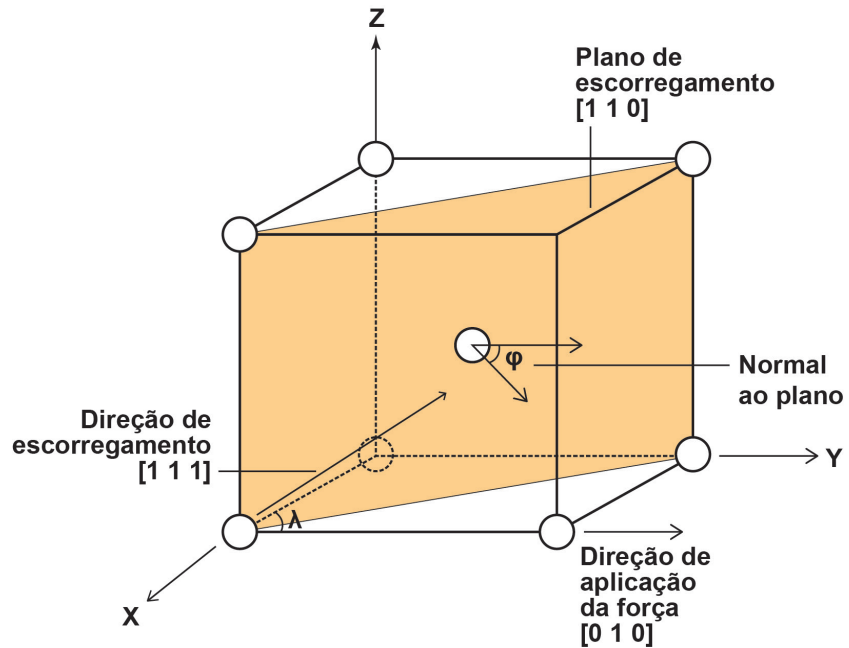


Figura 7.6: Reticulado cristalino CCC com destaque do plano (110) e da direção de escorregamento $[\bar{1}11]$.

Nessa célula unitária CCC, temos representado todos os elementos: plano de escorregamento, direção de escorregamento, normal ao plano de escorregamento, direção de aplicação da força, ϕ (ângulo entre a força aplicada e a normal do plano de escorregamento) e λ (ângulo entre a força aplicada e a direção de escorregamento).

Para calcular a tensão cisalhante resolvida pela equação $\tau_R = \sigma \cos \phi \cos \lambda$, precisamos determinar os ângulos ϕ e λ .

Para determinar ϕ : a normal do plano forma um ângulo de 90° com o plano, e a direção de aplicação da força está a 45° do plano. Então $\phi = 45^\circ$.

Para determinar λ :

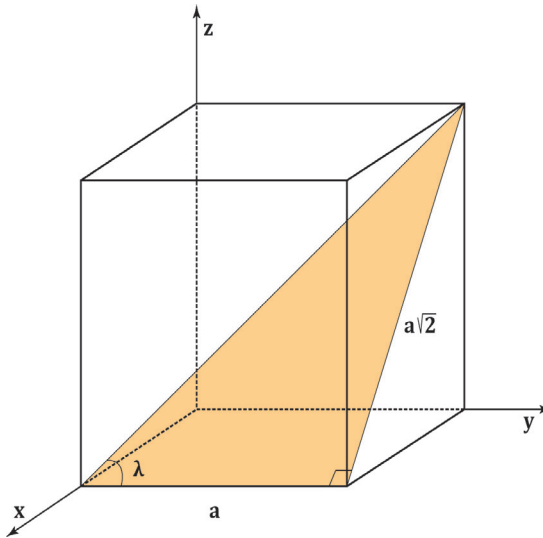


Figura 7.7: Triângulo para determinar valor de λ .

A partir do triângulo formado na **Figura 7.7**, o ângulo entre as direções $[\bar{1}11]$ e $[010]$ pode ser calculado através de uma relação de tg.

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{a\sqrt{2}}{a} = \sqrt{2}$$

Fazendo o inverso da função tg, temos que $\lambda = 54,7^\circ$.

$$\text{Então: } \tau_R = \sigma \cos \lambda \cos \phi = 52 \text{ (MPa)} (\cos 54,7) (\cos 45) = 21,3 \text{ MPa}$$

Atividade 1

Atende ao objetivo 1

Considere um monocristal de Fe CCC orientado com uma tensão externa aplicada na direção $[010]$. Se o deslizamento ocorre no plano (110) e na direção $[\bar{1}11]$, e a tensão cisalhante crítica resolvida (τ_{RC}) é de 30 Mpa, calcule a magnitude da tensão externa de tração (σ) a ser aplicada para iniciar o escoamento (σ_y).

Resposta comentada

A tensão de escoamento, σ_y , pode ser calculada pela equação:

$$\tau_R = \sigma_y \cos \lambda \cos \phi$$

Como esse exercício possui as mesmas condições do exemplo dado anteriormente, podemos utilizar os valores já calculados de ϕ (45°) e λ ($54,7^\circ$):

$$\sigma_y = \frac{\tau_{RC}}{\cos \lambda \cos \phi} = \frac{30 \text{ MPa}}{(\cos 54,7)(\cos 45)}$$

$$\sigma_y = 73,4 \text{ MPa}$$

Em materiais policristalinos, o escorregamento é mais complexo devido ao grande número de grãos com orientações diferentes, mesmo se tratando do mesmo sistema de escorregamento. Cada grão possuirá planos e direções de escorregamentos com ângulos distintos dos vizinhos, conforme podemos observar na **Figura 7.8**.

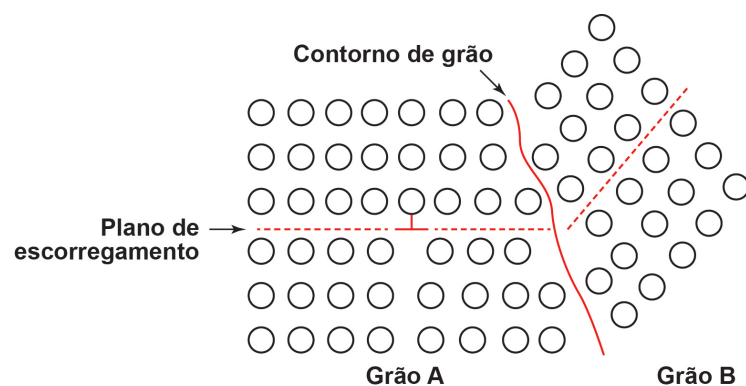


Figura 7.8: Sistemas de escorregamento em grãos com orientações diferentes.

Quando se supera a tensão de escoamento, inicia-se o movimento das discordâncias nos grãos “melhores orientados” com a tensão exter-

na aplicada em relação ao sistema de escorregamento preferencial. À medida que a tensão aumenta, as discordâncias em grãos com outras orientações vão atingindo a tensão cisalhante necessária.

Mecanismos de aumento de resistência

A deformação plástica de um metal depende da facilidade com que as discordâncias podem se mover. A restrição do movimento de uma discordância torna o material mais resistente. Portanto, a maioria dos métodos para aumentar a resistência dos metais está diretamente relacionada ao aumento da dificuldade de movimento das discordâncias. Em materiais monofásicos, ou seja, que só possuem uma fase, os principais mecanismos de aumento de resistência são encruamento, por solução sólida e diminuição do tamanho do grão.

Encruamento

O encruamento é um fenômeno em que a deformação plástica, realizada a baixas temperaturas (técnica conhecida por deformação a frio), causará o endurecimento e o consequente aumento de resistência do metal. Tal fenômeno ocorre basicamente porque os metais se deformam plasticamente por movimento de discordâncias.

As discordâncias interagem tanto diretamente entre si ou com outras imperfeições (por exemplo, contorno de grão) quanto indiretamente com o campo de tensões internas de várias imperfeições e obstáculos. Essas interações levam à criação de mais discordâncias e, consequentemente, a uma redução na mobilidade delas, o que é acompanhada pela necessidade de uma tensão maior para provocar maior deformação plástica.

Observe os gráficos da **Figura 7.9**.

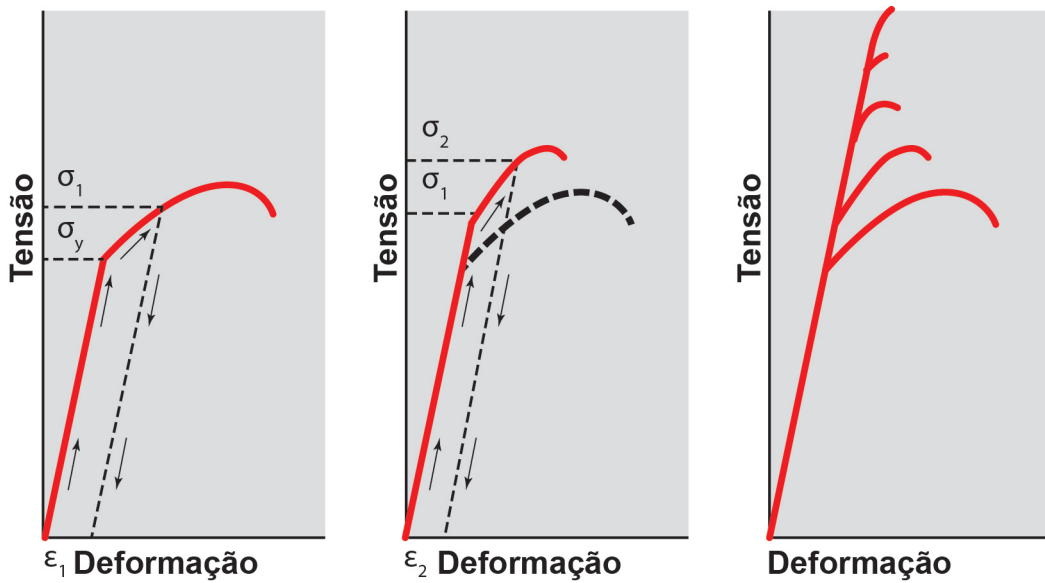


Figura 7.9: Curvas tensão-deformação com encruamento.

No gráfico da **Figura 7.9** (a), temos a curva tensão vs. deformação de um material que não sofreu qualquer deformação. Se, durante um ensaio de tração, ao atingir a tensão σ_1 após o escoamento, a carga for retirada, o corpo de prova (CP) apresentará uma deformação permanente ϵ_1 . Se subtermos novamente esse CP a um ensaio de tração, ele apresentará uma tensão de escoamento maior do que apresentou no primeiro ensaio (**Figura 7.9 b**). Isso acontece porque como houve deformação plástica no primeiro ensaio, o material encruou, ou seja, ficou mais resistente. Caso esse procedimento seja feito sucessivamente, a cada ensaio a tensão de escoamento ficará maior tornando o material mais resistente, porém mais frágil (**Figura 7.9 c**).

A deformação a frio muitas vezes é indispensável no processo de fabricação de um componente. Por exemplo, o processo de conformação de uma lataria de um carro é um processo de conformação mecânica e ocorre a frio. Após o processo, o material se encontra encruado, mas para a sua utilização esse encruamento é prejudicial. Então, após o encruamento, se quisermos reestabelecer as características mecânicas do material, podemos realizar um tratamento térmico de **recristalização**.

Recristalização

Tratamento feito a altas temperaturas para eliminar os efeitos da deformação a frio.

Solução sólida

Átomos de soluto ocupam lugares da rede cristalina de um dado metal, seja ele substitucional ou intersticial. Esses átomos provocam distor-

ção na rede, pois possuem dimensões diferentes do espaço que podem ocupar. Para minimizar energia, os átomos procuram lugares onde possam se acomodar mais facilmente, ou seja, junto às discordâncias.

Mas por que junto às discordâncias? Vimos nesta aula que as discordâncias criam ao seu redor regiões trativas e compressivas (**Figura 7.4 a**).

Podemos observar na **Figura 7.10** como os átomos de soluto se acomodam próximo às discordâncias. Os átomos de soluto substitucionais, se forem menores que os átomos de solvente, tendem a se localizar na região compressiva (**Figura 7.10 b**) e os maiores, na região trativa (**Figura 7.10 a**). Já os átomos de soluto intersticiais tendem a ficar na região trativa (**Figura 7.10 c**).

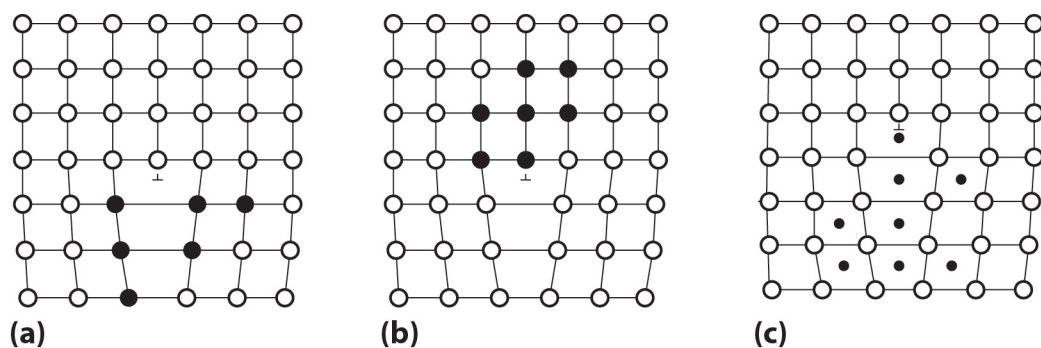


Figura 7.10: Localização dos átomos de soluto próximo às discordâncias. (a) Solute substitucional com átomos grandes. (b) Solute substitucional com átomos pequenos (c) Solute intersticial.

Na sequência de **Figuras 7.11, 7.12 e 7.13**, podemos observar a interferência dos solutos na movimentação das discordâncias.

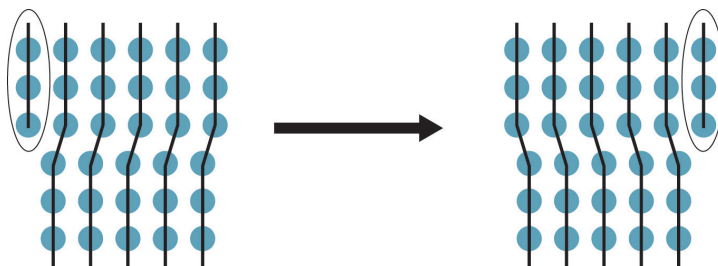


Figura 7.11: Discordâncias livres, quando não há empecilhos.

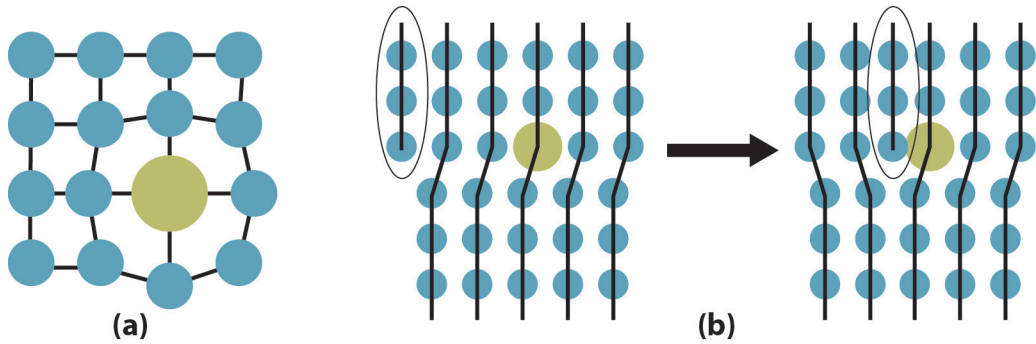


Figura 7.12: (a) Solução sólida substitucional. (b) Discordâncias barradas por átomos substitucionais.

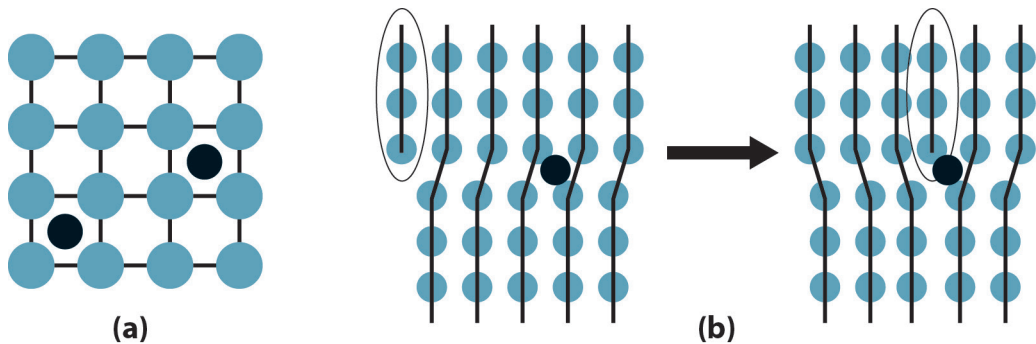


Figura 7.13: (a) Solução sólida intersticial. (b) Discordâncias barradas por átomos intersticiais.

Na **Figura 7.11**, temos a movimentação da discordância ocorrendo sem nenhum empecilho. Já nas **Figuras 7.12 e 7.13**, a movimentação da discordância é dificultada pela presença dos átomos de soluto. Quando há dificuldade de movimentação, a tensão cisalhante necessária para a discordância vencer o átomo de soluto é maior. Dessa forma, é necessária a aplicação de uma tensão externa maior para iniciar e dar continuidade à deformação plástica em ligas com solução sólida.

Refino do tamanho de grão

Quando uma discordância encontra um contorno de grão, ela tem que mudar de direção já que a direção do sistema de escorregamento também muda. Isso faz com que o contorno do grão se torne um obstáculo (**Figura 7.8**).

Vale lembrar que a região do contorno (de 2 a 10 Å) é extremamente conturbada, ou seja, os átomos não têm uma organização definida. Sendo

assim, quanto menores os tamanhos dos grãos, mais contornos estarão no caminho das discordâncias. Nesses casos, será necessária, mais força de cisalhamento sobre os planos para que as discordâncias vençam a desorganização atômica do contorno e consigam mudar de direção de movimentação ao passar para outro grão. O material fica mais resistente.

Atividade 2

Atende ao objetivo 2

1. Para entender os mecanismos de endurecimento, é importante conhecer a relação entre o movimento de discordâncias e o comportamento mecânico dos metais. Nessa relação, a capacidade de um material deformar-se plasticamente depende da capacidade de as discordâncias se moverem. Sobre esse assunto, julgue se as afirmações a seguir são verdadeiras ou falsas.

- a) () Redução do tamanho de grão, solução sólida, deformação a frio são formas de dificultar o movimento das discordâncias.
- b) () A quantidade de discordâncias não é alterada durante a deformação plástica.
- c) () Os átomos de soluto tendem a se localizar junto às discordâncias para reduzir as tensões na estrutura cristalina.
- d) () Um material com tamanho de grão menor tem maior limite de escoamento, pois as discordâncias têm menor caminho livre antes de esbarrar num contorno de grão.
- e) () Quando duas discordâncias se encontram, elas se anulam mutuamente, deixando uma região de cristal perfeito.
- f) () Um material metálico com uma granulação maior apresenta uma menor área de contornos de grãos

2. Como variam as propriedades mecânicas dos aços, como resistência, dureza e ductilidade, de acordo com o teor de carbono?

Resposta comentada

1.

a) (V) Redução do tamanho de grão, solução sólida e deformação a frio são os principais mecanismos de endurecimento (aumento de resistência).

b) (F) A deformação plástica gera mais discordâncias porque o movimento de discordâncias provoca interações entre si ou com outras imperfeições. Dessa forma, são criadas mais discordâncias e, conseqüentemente, leva-se a uma redução na mobilidade delas, a qual é acompanhada pela necessidade de uma tensão maior para provocar maior deformação plástica.

c) (V) As discordâncias criam ao seu redor regiões trativas e compressivas. Os átomos de soluto provocam distorção na rede porque possuem dimensões diferentes do espaço que podem ocupar. Para minimizar energia, eles procuram lugares onde possam se acomodar mais facilmente: junto às discordâncias.

d) (V) Os contornos de grão são barreiras porque a discordância precisa mudar a direção de movimentação.

e) (F) As discordâncias só se anulam mutuamente deixando uma região de cristal perfeito se elas forem opostas, ou seja, se as regiões trativas e compressivas estiverem em sentidos opostos.

f) (V) Quanto maior o tamanho de grão, menos grãos existem e conseqüentemente as áreas de contornos são menores.

2. Os aços são ligas ferro-carbono nas quais o ferro é o solvente e o carbono o soluto. Uma das formas de aumentar a resistência mecânica dos metais é por solução sólida. Este é exatamente o papel do carbono dentro do reticulado cristalino do ferro: formar solução sólida. Então, a presença de átomos de impureza causa deformações na rede cristalina do solvente restringindo o movimento das discordâncias e assim alterando as propriedades dos aços.

Conclusão

A compreensão do fenômeno de deformação plástica possibilita-nos a modificação dos materiais a fim de produzir produtos com características específicas para uma determinada aplicação.

Resumo

Após o término desta aula, podemos concluir que:

- A tensão aplicada sobre um corpo deve superar a tensão de escoamento para que haja deformação plástica.
- A deformação plástica não modifica o reticulado cristalino.
- Para ocorrer a deformação plástica, os átomos precisam “rolar” uns sobre os outros.
- O principal mecanismo de deformação plástica é o movimento das discordâncias.
- A discordância movimenta-se sob uma tensão cisalhante mínima em uma direção preferencial, pois são os esforços de cisalhamento (resultante dos esforços externos) os responsáveis pelo movimento das discordâncias.
- A tensão de cisalhamento atua no sentido do movimento das discordâncias porque é necessário que haja rompimento das ligações químicas.
- O processo de movimento das discordâncias é chamado de escorregamento, e o plano cristalográfico, ao longo do qual a linha de discordância se movimenta, é chamado de plano de escorregamento.
- O escorregamento ocorre mais facilmente em planos e direções mais densos.
- Os metais que cristalizam na forma CFC são mais dúcteis que os CCC. Os HC são os mais resistentes entre as estruturas cristalinas preferenciais dos metais.
- A discordância dentro da estrutura cristalina gera uma região de tensões compressivas e trativa em torno dela;
- Quando duas discordâncias se deslocam em uma mesma direção elas podem:
 - se repelir, caso as duas possuam a região compressiva no mesmo sentido;
 - se atrair e, conseqüentemente, se aniquilar, caso possuam a região compressiva em sentidos opostos.
- Em policristais, cada grão possuirá planos e direções de escorregamentos com ângulos distintos dos vizinhos, ainda que se trate do

mesmo sistema de escorregamento (orientações cristalinas diferentes em cada grão).

- A restrição de uma discordância se mover torna o material mais resistente.
- O encruamento é um fenômeno em que a deformação plástica, realizada a baixas temperaturas, causará o endurecimento (aumento de resistência). Isso ocorre pois o movimento de discordâncias provoca interações entre si ou com outras imperfeições, o que leva à criação de mais discordâncias e, conseqüentemente, a uma redução de sua mobilidade. Essa redução é acompanhada pela necessidade de uma tensão maior para provocar maior deformação plástica.
- Para minimizar energia, os átomos de soluto procuram lugares onde possam se acomodar mais facilmente, como junto às discordâncias, o que dificulta o movimento delas.
- Os contornos de grão são barreiras para a movimentação das discordâncias porque o sistema de deslizamento muda de direção de um grão para outro.
- Quanto menor o tamanho dos grãos, mais contornos estarão no caminho das discordâncias, necessitando de mais força de cisalhamento sobre os planos para realizar a deformação plástica.

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, veremos outras propriedades mecânicas dos materiais. Até lá!

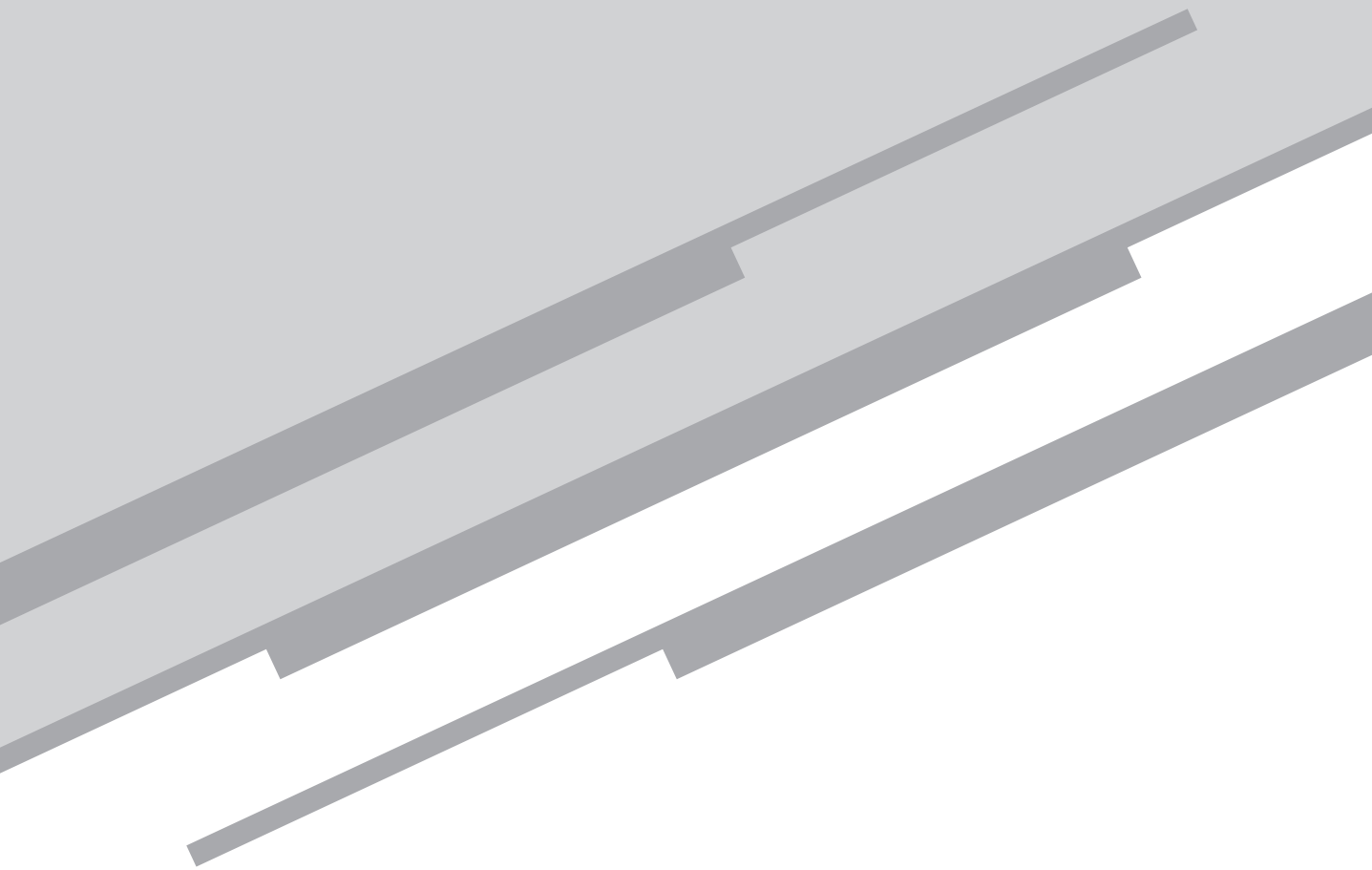
Referências

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

VAN VLACK, Laurence. *Princípios de ciência e tecnologia dos materiais*. Rio de Janeiro: Campos, 1994.

Aula 8

Transformação de fase em metais



Meta

Apresentar os conceitos relacionados à mudança de fase em materiais sólidos.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. descrever a cinética de transformação de fase;
2. identificar microestruturas em diagramas TTT e CCT.

Pré-requisitos

Antes de começar essa aula é importante relembrar os conceitos de *estrutura cristalina* e de *diagrama de fase*, principalmente o Fe-C.

Introdução

Nas Aulas 4 e 5, estudamos os diagramas de fase e vimos, para cada composição, qual temperatura seria necessária para uma fase se transformar em outra. Por exemplo, estudamos que, em uma liga Fe-C de composição eutetoide, a Austenita se transforma em *Ferrita* e *Cementita*, dando origem a fase conhecida como *Perlita*. A **Figura 8.1** ilustra atômica e como isso acontece.

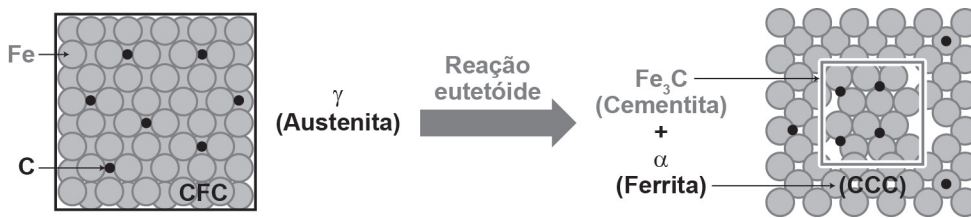


Figura 8.1: esquema ilustrativo da organização dos átomos antes e depois de uma reação eutetoide. A imagem da esquerda mostra uma estrutura cristalina CFC do ferro (austenita) com átomos de carbono no interstício.

Após a reação eutetoide, a Austenita se transforma em duas outras fases diferentes do ferro: a *ferrita* (estrutura CCC do ferro com carbono no interstício) e a *cementita* (carboneto de ferro), fatos que já estudamos em aulas anteriores.

Na Austenita, os átomos de Ferro estavam organizados sob uma estrutura CFC e os átomos de Carbono, distribuídos pelos interstícios do Ferro. Quando ocorre a reação eutetoide, os átomos de carbono precisam se movimentar (difusão), porque parte deles se juntará a átomos de Ferro e formará a Cementita, e parte deles ficará distribuída nos interstícios dos átomos de ferro que se rearranjaram e formaram uma estrutura CCC (Ferrita). Essa reação é controlada pela difusão do carbono e, devido a sua complexidade, algumas perguntas podem surgir:

- quanto tempo leva para acontecer essa transformação, ou seja, qual a sua taxa de transformação?
- se modificarmos a taxa de transformação, podemos obter outras microestruturas diferentes da Perlita? Quais?

Veremos nessa aula uma correlação entre a transformação de uma fase em outra, o tempo necessário para ocorrer essa transformação e quais microestruturas podemos obter em função da alteração da taxa de transformação. Para isso, usaremos como exemplo a reação eutetoide do diagrama Fe-C.

Conceitos básicos

Para começar a estudar a transformação de fase em metais, precisamos recordar alguns conceitos e estabelecer alguns outros novos. Vamos então relembrar os conceitos de fase, microestrutura e difusão atômica.

Fase: é uma porção homogênea do material, que possui propriedades físicas ou químicas uniformes. Ex: Ferrita é uma fase e Cementita, outra.

Microestrutura: é a morfologia de uma dada fase. A microestrutura se altera, dependendo da quantidade de fases, do tipo de fase e da proporção de cada fase. Ex: Perlita é uma microestrutura formada por duas fases (Ferrita + Cementita) e suas características dependem do percentual de cada uma das fases.

Difusão atômica: é o processo de movimento aleatório de átomos, quando termicamente ativados.

Esses conceitos já foram discutidos em aulas passadas, então, se você ainda tem alguma dúvida, não deixe de fazer uma revisão!

Tipos de transformação de fase em metais

A maioria das transformações de fase envolve uma mudança na microestrutura, e já sabemos que as propriedades de um material dependem da sua microestrutura. As transformações de fase podem ser divididas em:

- transformações com difusão atômica;
- transformações sem difusão atômica.

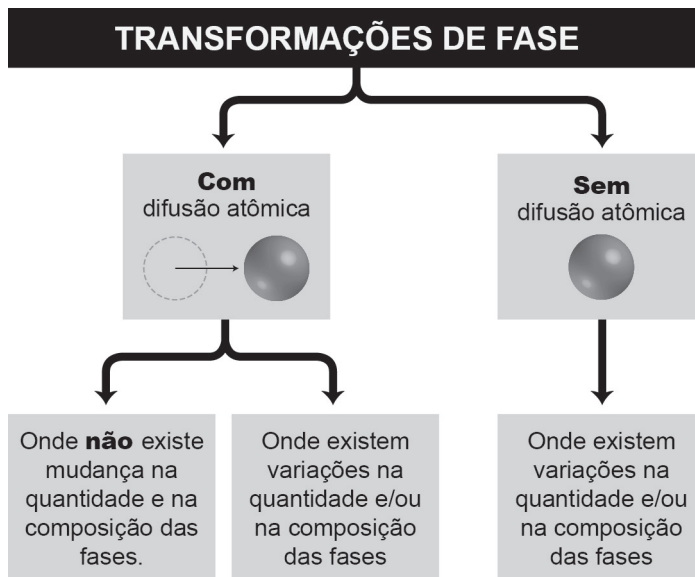


Figura 8.2: mapa mental da ocorrência das transformações de fase.

Mapa mental

Tipo de diagrama utilizado para a gestão (administração) de conhecimentos e informações.

Transformações com difusão atômica

Transformação onde não existe mudança na quantidade e na composição das fases.

Como exemplos desse tipo de transformação, temos:

- solidificação de metais puros: em que o Ferro puro líquido com 100% de átomos de Ferro (uma fase) se transforma em Ferro sólido (uma fase) com 100% de átomos de ferro ordenados sob a forma CCC.
- transformação alotrópica: em que o Ferro CCC (uma fase) se transforma em Ferro CFC (uma fase) a 912°C.

Transformações onde existem variações na quantidade e/ou na composição das fases.

Como exemplo desse tipo de transformação, temos:

- reação eutetoide na liga Fe-C: uma fase austenítica (uma fase com 0,78% de carbono) se transforma em ferrita + perlita (duas fases, cada uma com uma quantidade de carbono diferente).

Transformações sem difusão atômica

Neste tipo de transformação há a formação de uma fase metaestável, ou seja, em que as propriedades ou características mudam lentamente com o tempo, no entanto, não há mudanças muito perceptíveis na microestrutura e o estado de equilíbrio não é nunca alcançado.

Como exemplo desse tipo de transformação, temos:

- a transformação Martensítica nas ligas ferro carbono. O diagrama de equilíbrio de fases do Fe-C mostra que a transformação estável da Austenita é em Ferrita e Cementita. No entanto algumas condições de resfriamento podem levar a transformação da Austenita em Martensita. A Martensita é uma fase metaestável, porque ela não é prevista no diagrama Fe-C. Ainda nesta aula vamos falar mais sobre a transformação martensítica.

Cinética da transformação de fase

Se a transformação de fase é dependente da difusão atômica, como é o caso da maioria das transformações, elas então são necessariamente dependentes do tempo e, por isso, torna-se necessário estudar a cinética de transformação.

A transformação de fase se divide em dois estágios distintos:

- nucleação;
- crescimento.

Nucleação: é a formação da nova fase. É o aparecimento de núcleos ou partículas pequenas da nova fase que, em consequência da difusão (na maioria dos casos), favorecem o crescimento desses novos grãos.

Crescimento: é o crescimento da nova fase. Os núcleos aumentam até tomarem parcial ou totalmente a fase original, ou seja, até que se atinja o **equilíbrio termodinâmico**.

O crescimento é medido (quantificado) através da fração transformada em função do tempo, para uma dada temperatura constante, segundo a equação de Avrami:

$$y = 1 - \exp(-kt^n)$$

Em que:

Equilíbrio termodinâmico

Equilíbrio térmico, mecânico, radiativo e químico de um sistema. Nesse estado, não há fluxos de matéria ou de energia, não há mudanças de fase e não há potenciais desequilibrados (ou forças motrizes), dentro do sistema.

Y = fração do volume transformado;

K = constante relacionada à temperatura;

N = constante relacionada ao tipo de nucleação;

T = tempo.

A curva da **Figura 8.3** representa o comportamento cinético típico para maioria das reações em estado sólido, onde se tem a relação da fração da fase transformada (y) e o logaritmo do tempo de aquecimento (essas reações são as de maior interesse para os engenheiros e é onde a reação eutetoide se encaixa).

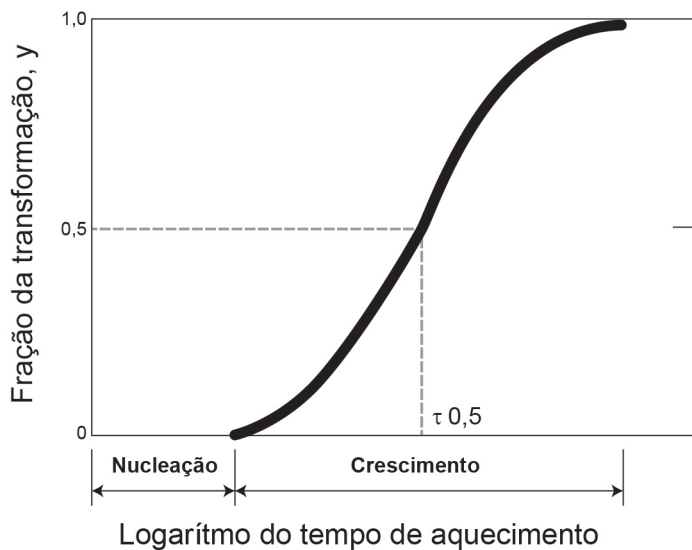


Figura 8.3: fração da transformação da reação em função do logaritmo do tempo, típico para muitas transformações em estado sólido, em que a temperatura é mantida constante. Na figura, “ $t_{0,5}$ ” significa o tempo para metade da transformação (fração transformada de 0,5). Cada transformação leva um tempo diferente para atingir essa fração.

Por convenção estabeleceu-se que a taxa de transformação da reação corresponde ao inverso do tempo necessário para ocorrer metade da transformação.

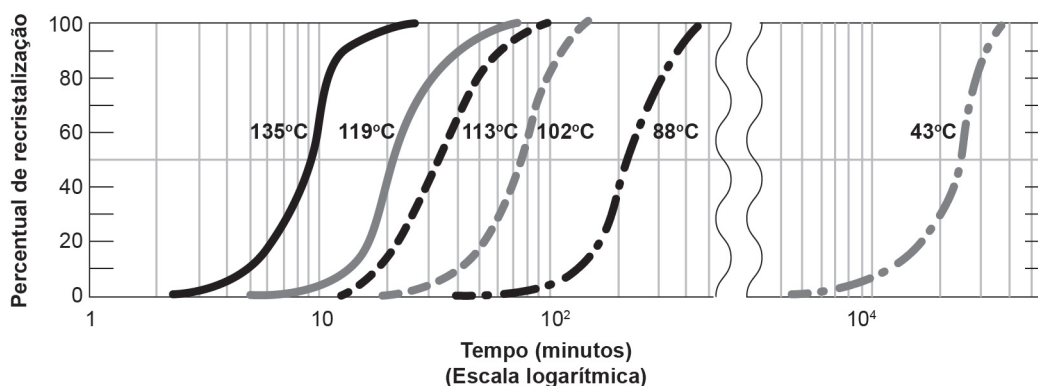
$$r = \frac{1}{t_{0,5}}$$

Onde:

r = taxa de transformação;

$t_{0,5}$ = tempo referente à metade da transformação.

A temperatura tem uma influência sobre a cinética de transformação. Vamos exemplificar através da **Figura 8.4**, as curvas para a **recristalização** de uma liga metálica hipotética em diferentes temperaturas.



Recristalização

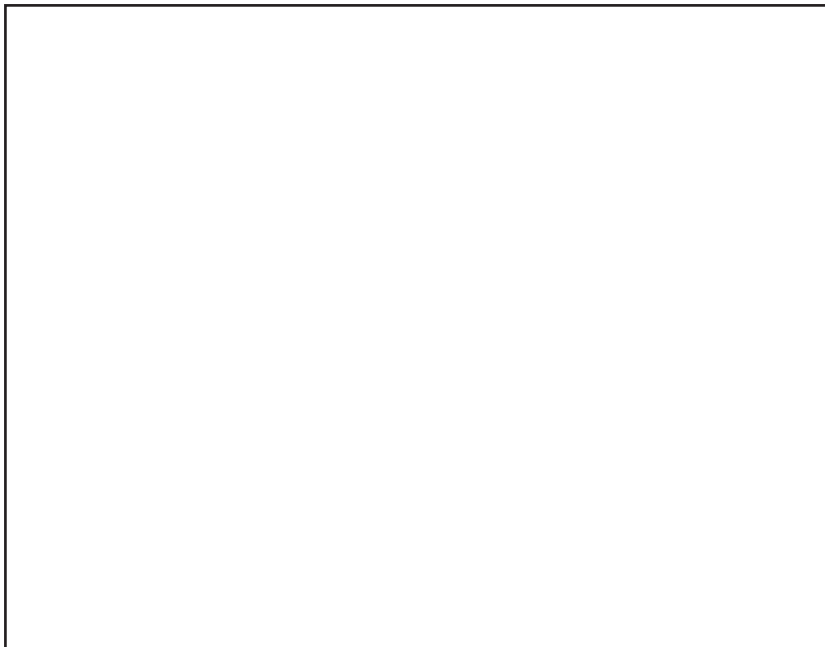
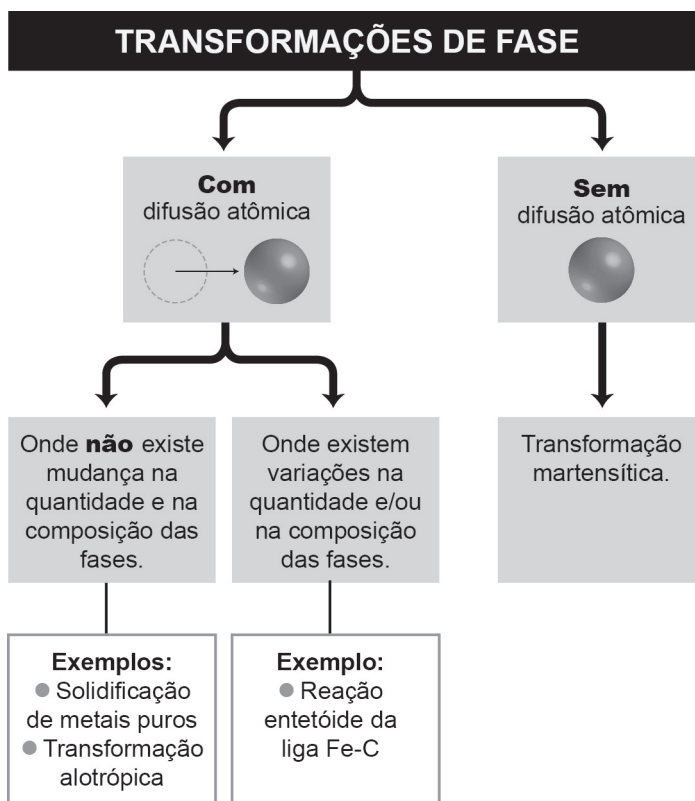
Um processo efetuado por aquecimento, por meio do qual os grãos deformados são substituídos por um novo conjunto de grãos, que formam núcleos e crescem, até que os grãos originais sejam totalmente consumidos.

Figura 8.4: curvas da cinética de recristalização de uma liga metálica hipotética em várias temperaturas. As curvas da figura mostram que, dependendo da temperatura em que a transformação de fase ocorre, os tempos para nucleação da nova fase e para o seu posterior crescimento aumentam, com a diminuição da temperatura.

Atividade 1

Atende ao objetivo 1

Faça um mapa mental simples, apresentando as transformações de fase em metais e oferecendo pelo menos um exemplo de cada uma delas. Para aprender a fazer um mapa mental, assista ao vídeo em: <<https://www.youtube.com/watch?v=BuQ89QsHE9g>>. Não se preocupe em fazê-lo de forma perfeita, pois você aperfeiçoará a sua técnica à medida que for praticando, certo? Vamos lá!

**Resposta comentada**

Curvas ou diagramas TTT (Tempo x Temperatura x Transformação)

As curvas TTT são importantes para correlacionarmos as transformações de fase mostradas pelos diagramas de fase como tempo necessário para que a transformação ocorra.

Construção das curvas

Os diagramas de fase são ferramentas importantes para prever a microestrutura de um determinado material. No entanto, os diagramas mostram a possibilidade termodinâmica (energética) de tal reação acontecer sem nenhuma consideração em relação ao tempo necessário.

As condições de equilíbrio caracterizadas pelo diagrama de fases ocorrem apenas quando o resfriamento é dado em taxas extremamente lentas, o que para fins práticos é inviável.

Um resfriamento fora do equilíbrio pode ocasionar:

- ocorrência de fases ou transformações em temperaturas diferentes daquelas previstas no diagrama;
- existência, à temperatura ambiente, de fases que não aparecem no diagrama (fases metaestáveis).

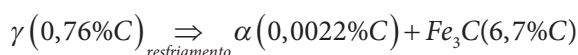
Os diagramas TTT vão nos auxiliar a fazer uma correlação entre tempo e temperatura na ocorrência de uma transformação de fase, e determinar qual a microestrutura final. Vamos estudar os diagramas TTT para as transformações austeníticas. As transformações que ocorrem a partir da Austenita são importantes para os **tratamentos térmicos** das ligas ferrosas.

Tratamento térmico

É o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas.

As curvas TTT estabelecem relações entre a temperatura em que ocorre a transformação da Austenita e a estrutura e propriedades das fases produzidas com o tempo. As transformações se processam à temperatura constante.

Vamos primeiro entender como esses diagramas são formados, relembrando a reação eutetoide de formação da Perlita?



A temperatura desempenha um papel importante na transformação da Austenita em Perlita. Observe o gráfico da **Figura 8.5**. Ele mostra a

cinética de reação de amostras de liga Fe-C com composição eutetoide resfriadas rapidamente até as temperaturas indicadas e mantidas constantes até o final da reação.



Vamos lembrar que a reação eutetoide só é possível a partir de uma temperatura de 727°C. Essa é a linha A1 do diagrama Ferro-carbono. Você pode fazer uma revisão da reação eutetoide na Aula 5.

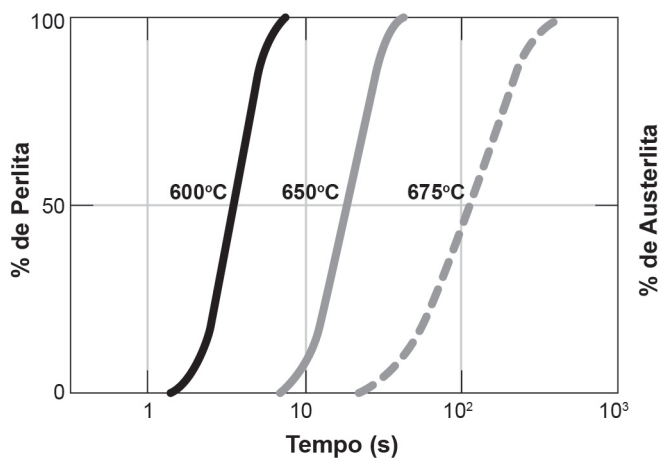


Figura 8.5: curvas cinéticas (fração de transformação x log tempo) para resfriamento de liga ferro-carbono, com composição eutetoide, para três temperaturas constantes.

A curva TTT é gerada a partir das curvas de cinética em diversas temperaturas, como demonstrado na **Figura 8.6**.

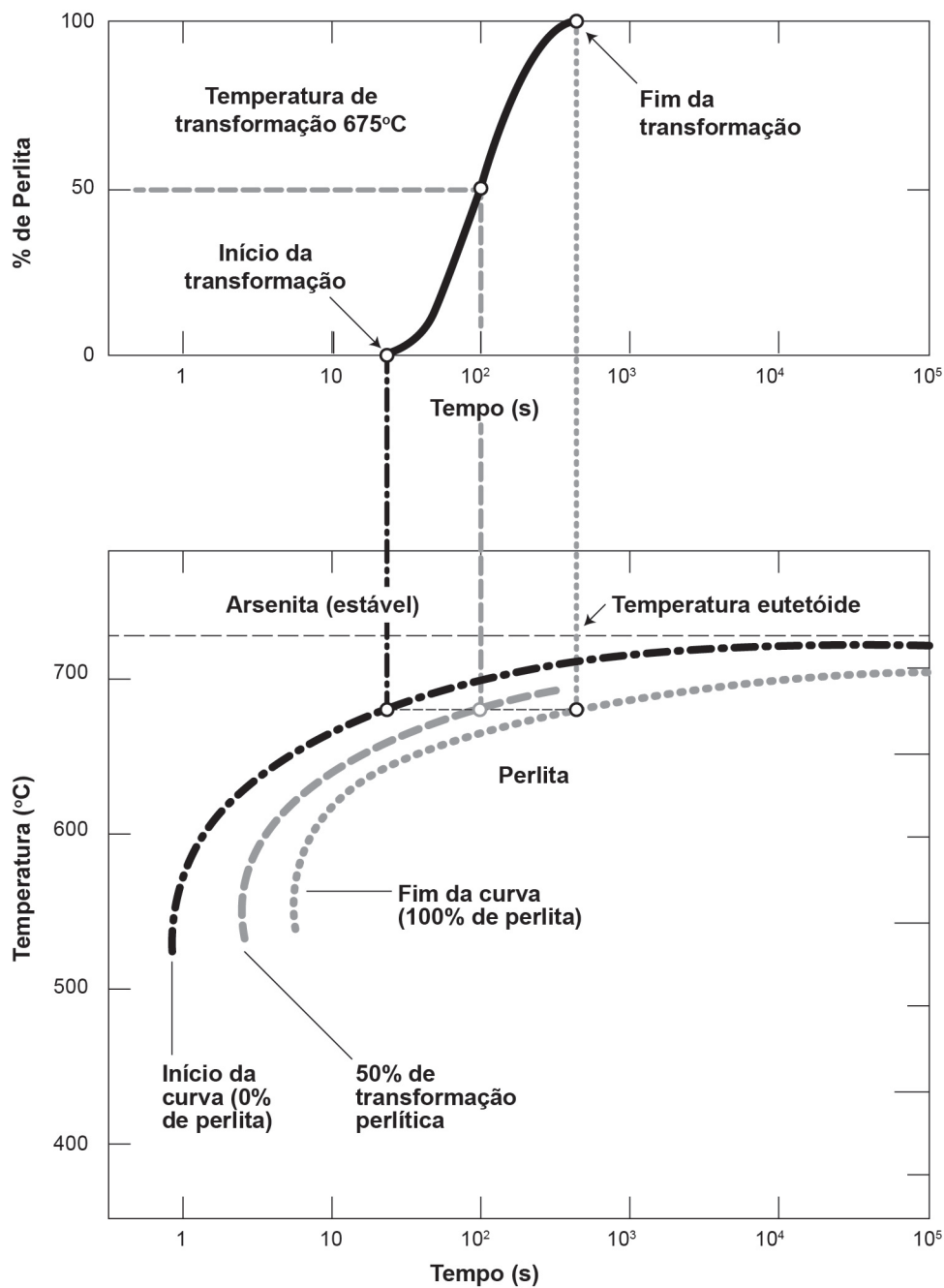


Figura 8.6: construção do diagrama TTT a partir das curvas da cinética de transformação da Austenita de uma liga Fe-C eutetoide.

A Curva TTT mostra o intervalo de transformação em cada temperatura. Para cada temperatura, o intervalo de tempo é marcado em um gráfico da temperatura em função do tempo, gerando **isotermas**. A união do início e fim dos intervalos marcados gera a curva de início e fim, respectivamente, da transformação em cada temperatura. Mas essa curva é específica para a composição eutetoide. Para cada liga de ferro-carbono (para cada composição) uma curva TTT deve ser obtida.

Vale lembrar que nas condições em que foi obtida, a curva TTT só é precisa quando a temperatura da liga é mantida constante (isoterma).

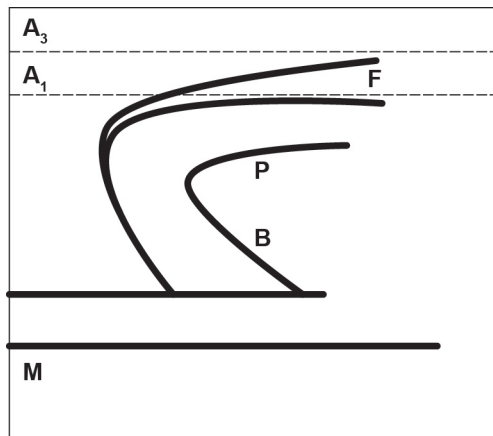
As curvas mostradas até agora se referem a ligas Fe-C de composição eutetoide. Podemos obter curvas TTT para ligas de Fe-C hipoeutetoides e hipereutetoides. Nessas ligas, temos a formação de uma fase pró-eutetoide e isso deve aparecer nas curvas TTT.

O diagrama da **Figura 8.7(a)** mostra a curva TTT hipotética de ligas hipoeutetoides e hipereutetoides.

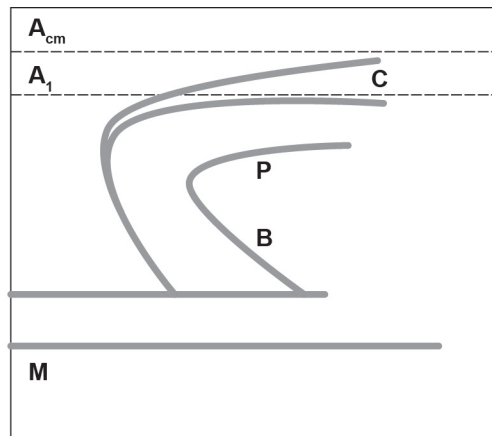
Isotermas

Linhas que representam invariância da temperatura, ou seja, quando temperatura é mantida constante.

Hipoeutetóide



Hipereutetóide



LEGENDA

P-Perlita
B-Bainita
M-Martensita

F-Ferrita
C-Cementita
(cont. de grão)

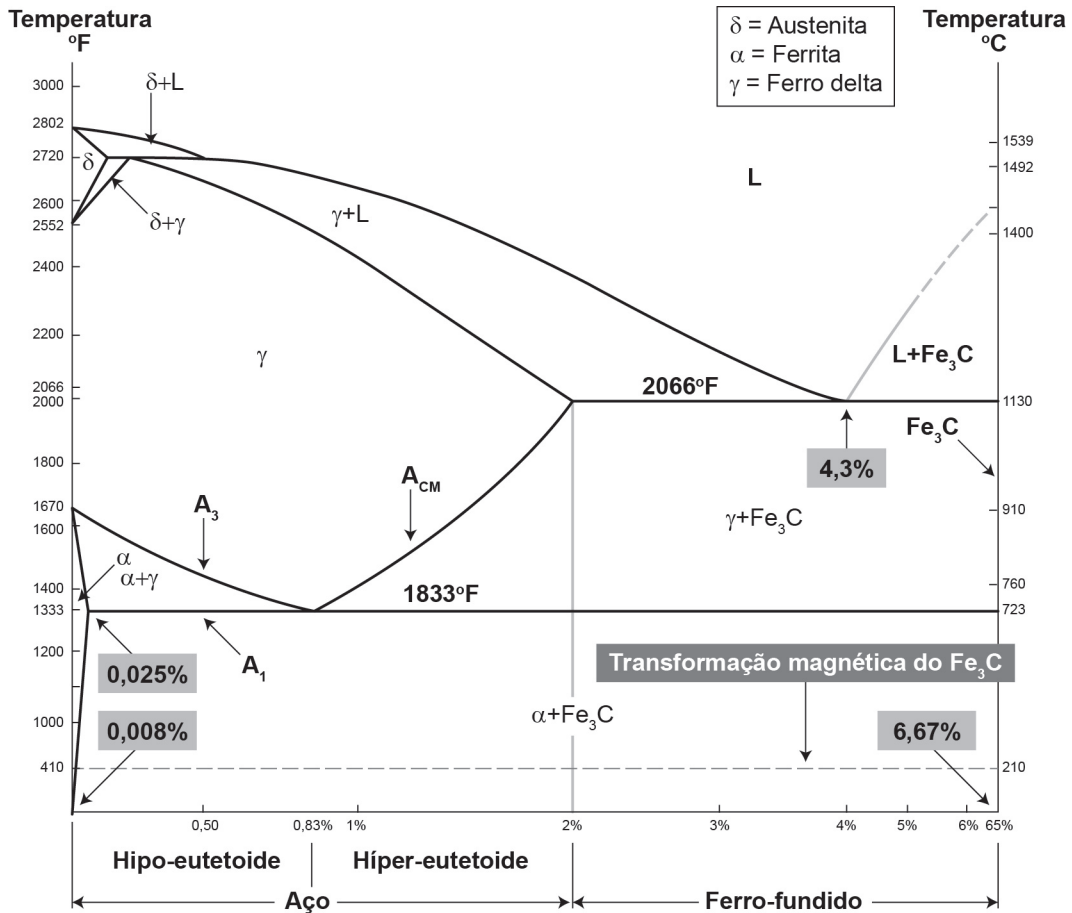


Figura 8.7: (a) curvas TTT hipotéticas para aços hipoeutetóides e hipereutetóides; (b) diagrama Ferro-Carbono destacando ligas hipoeutetóides e hipereutetóides.

Na **Figura 8.7 (a)** temos as curvas TTT para os aços hipoeutetóides e hipereutetóides. Nela, podemos observar uma região de existência da fase pró-eutetoide ou primária, conforme estudamos na Aula 5.

Para relembrar e correlacionar o tipo de aço com a curva correspondente da **Figura 8.7 (a)**, na **Figura 8.7 (b)**, temos o diagrama Fe-C mostrando a composição dos aços hipo e hipereutetóides.

Microestruturas formadas pela transformação austenítica.

A partir da curva TTT, podemos estudar o tratamento isotérmico de uma liga eutetoide e observar como a microestrutura se comporta, como demonstrado na **Figura 8.8**.

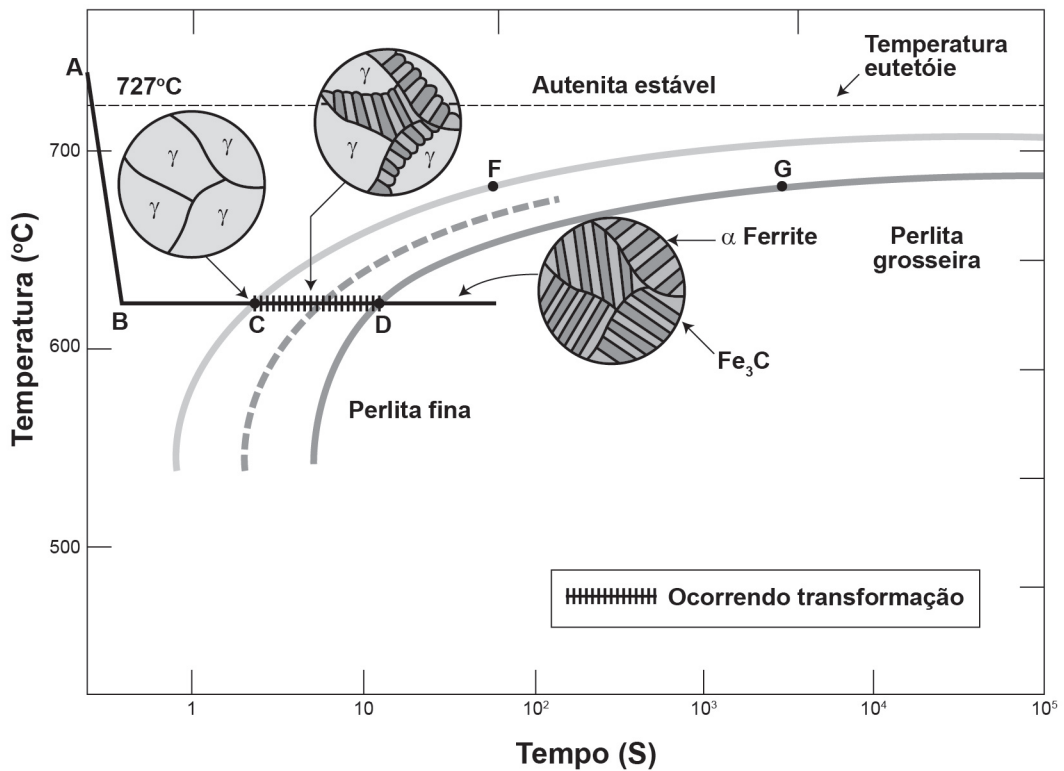


Figura 8.8: Diagrama de transformação isotérmica para uma transformação isotérmica ABCD de uma liga ferro-carbono eutetoide.

Nesse tratamento, a liga foi aquecida acima de 727°C, para garantir que a microestrutura inicial, antes do resfriamento, seja toda austenítica. Então a liga é resfriada rapidamente até a temperatura de aproximadamente 625°C e mantida constante, até que toda a transformação ocorra. Após aproximadamente 2s, atinge-se a linha de início da transformação, isto é, a Austenita começa a se transformar em Perlita. Com o passar do tempo, a transformação prossegue até que, após aproximadamente 10s, toda a microestrutura se encontra perlítica.

Agora vamos observar a **Figura 8.9**.

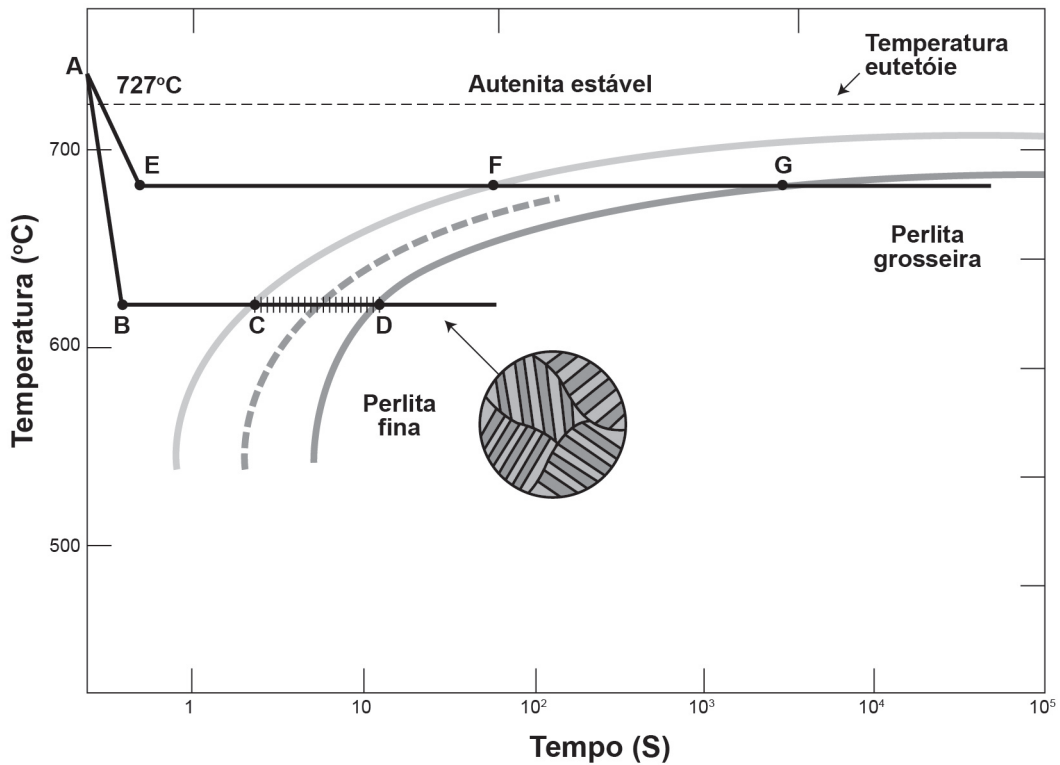


Figura 8.9: Diagrama de transformação isotérmica para duas transformações em temperaturas diferentes (AEFG) e (ABCD).

As espessuras das lamelas de Ferrita e Cementita na Perlita dependem da temperatura em que ocorre a transformação.

Na transformação AEGH, apresentada na **Figura 8.9**, temos a formação de Perlita grosseira. Isso acontece porque o tempo de reação é grande o suficiente para ocorrer a difusão do carbono em distâncias relativamente grandes e a formação de camadas mais espessas. Na transformação ABCD, como o tempo da transformação é mais rápido do que o da transformação AEGH, não há tempo de difusão a grandes distâncias, e as camadas de Ferrita e Cementita são mais finas.

A formação da ferrita e da cementita dependem da difusão e, portanto, as camadas de ferrita e cementita são mais finas para tempos mais curtos de transformação. Essa diferença física da Perlita (espessura das camadas de Ferrita e Cementita) influencia nas propriedades mecânicas do material formado por essas microestruturas. E, se influencia na resistência mecânica do material, na prática, os materiais são dotados de resistências diferentes.

Além da Perlita, duas outras microestruturas podem resultar da transformação Austenítica, aparecendo para temperaturas de transformação mais baixas do que as necessárias para a Perlita: a Bainita e a Martensita.

Bainita

A formação da Perlita já foi estudada na aula de diagramas de fase, na qual estudamos o diagrama ferro-carbono. Como a Bainita e a Martensita são fases metastáveis, elas não aparecem no diagrama de equilíbrio termodinâmico do ferro-carbono, mas apenas quando estudamos as transformações fora do equilíbrio.

A Bainita é uma mistura de fases Ferrita e Cementita, e é dependente da partição do carbono, controlada por difusão, entre a Ferrita e a Cementita, assim como a Perlita. Entretanto, ao contrário da Perlita, a Ferrita e a Cementita estão presentes numa rede não lamelar, cujas características são dependentes da composição da liga e da temperatura de transformação.

A transformação bainítica também pode ser representada em um diagrama isotérmico (TTT) conforme a **Figura 8.10**.

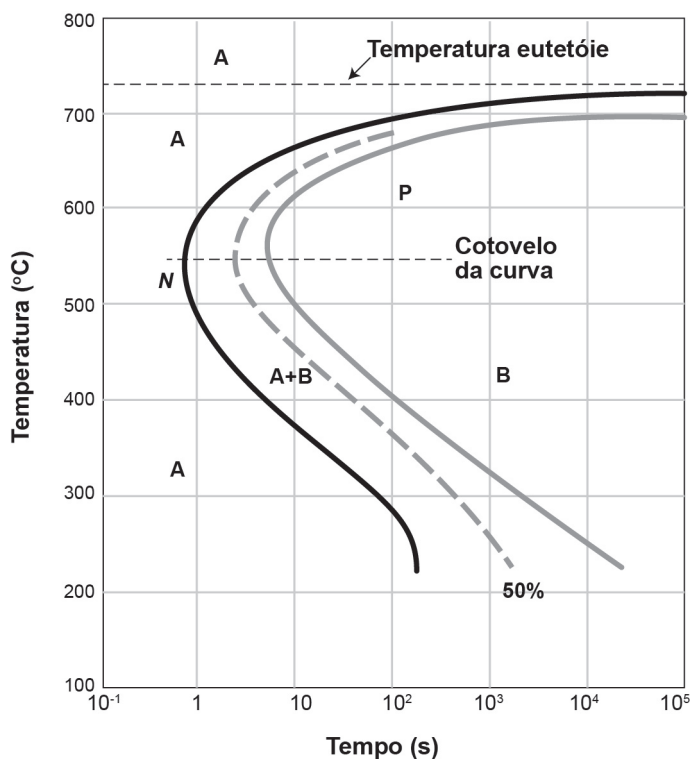


Figura 8.10: Diagrama de transformação isotérmica para liga Fe-C eutetóide. A, para Austenita; B, para Bainita; e P, para Perlita.

A formação da Bainita acontece para transformações que se iniciam em temperaturas abaixo do “cotovelo” da curva TTT.

Martensita

A Martensita é uma fase que se forma quando ligas Fe-C austenitizadas são resfriadas rapidamente (ou temperadas) até temperaturas relativamente baixas. Ela se forma fora do equilíbrio e é resultado de uma transformação adifusional da Austenita.

A transformação martensítica ocorre quando o resfriamento é rápido o suficiente para evitar a difusão do carbono. Qualquer difusão que aconteça resultará na formação das fases Ferrita e Cementita. A transformação martensítica pode ser observada também no diagrama de transformação TTT, conforme a **Figura 8.11**.

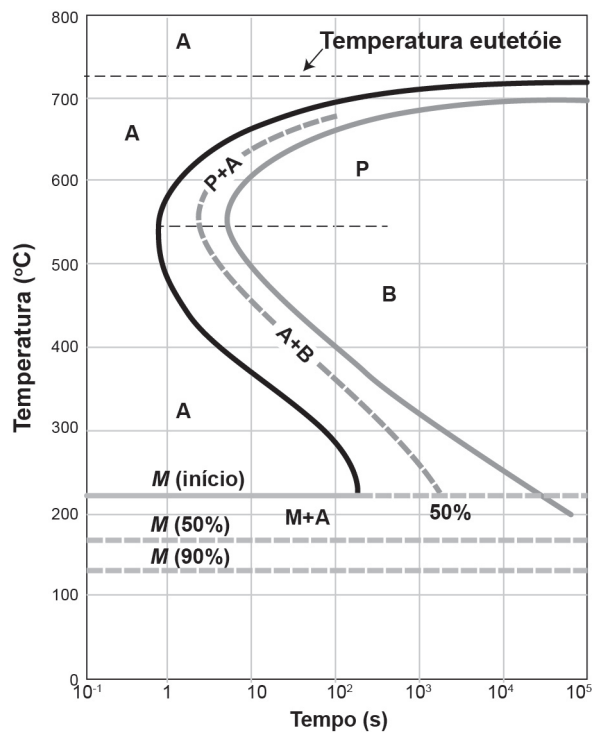


Figura 8.11: Diagrama de transformação isotérmica para liga Fe-C eutetoide. *A*, para Austenita; *B*, para Bainita; *P* para Perlita; *M* para Martensita.

A transformação martensítica é adifusional (transformação sem difusão atômica) e, consequentemente, tem exatamente a mesma composição da Austenita que lhe deu origem, podendo chegar até 2% C, dependendo da composição da liga. Uma vez que a difusão é suprimida do processo de transformação, devido ao resfriamento rápido, os átomos de Carbono não podem se distribuir entre a Ferrita e a Cementita, ficando aprisionados

nos sítios octaédricos da estrutura cúbica de corpo centrado (característica da Ferrita), produzindo, assim, uma nova fase, a Martensita.

Como a solubilidade do Carbono na estrutura C.C.C é excessivamente excedida quando a Martensita se forma, então esta assume uma estrutura Tetragonal de Corpo Centrado com uma célula unitária, cujo parâmetro C da rede (altura da célula) é maior que o parâmetro A da base. Quanto maior a concentração de Carbono na Martensita, maior o número de sítios intersticiais preenchidos, acarretando num acréscimo da tetragonalidade da rede T.C.C.

Vamos observar um exemplo de como o diagrama da **Figura 8.10** pode nos auxiliar para determinarmos qual microestrutura será resultante de um resfriamento. Então vamos observar o diagrama da **Figura 8.12** e o resfriamento representado pela linha 1.

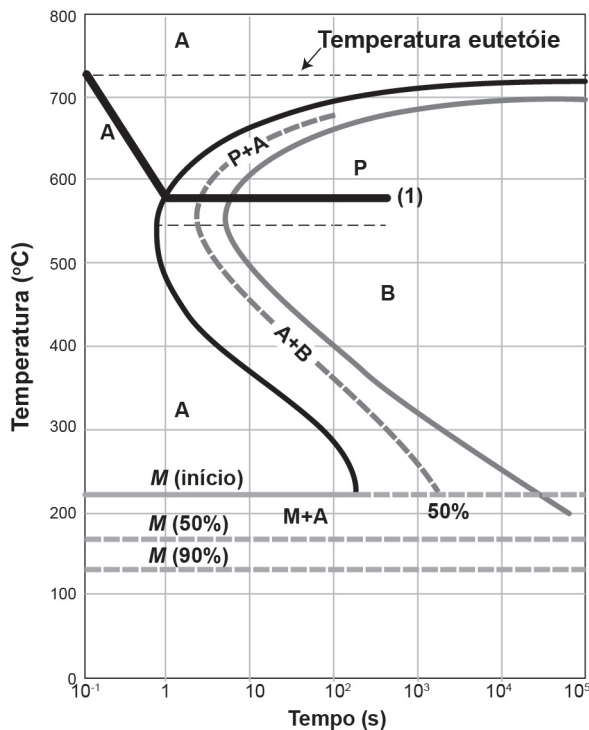


Figura 8.12: Diagrama de transformação isotérmica para liga Fe-C eutetoide. *A*, para Austenita; *B*, para Bainita; *P* para Perlita; *M* para Martensita.

O resfriamento começa de uma temperatura acima da temperatura eutetoide. Isso significa que a microestrutura do material nesse momento é austenítica. A taxa de resfriamento faz com que se atinja uma temperatura em um determinado tempo, na curva de início da transforma-

ção perlítica. Essa temperatura é mantida por um tempo suficiente até que toda a austenita se transforme em perlita. Então temos um material com uma microestrutura perlítica.

Atividade 2

Atende ao objetivo 2

Identifique as microestruturas resultantes das sequências de resfriamento indicadas.

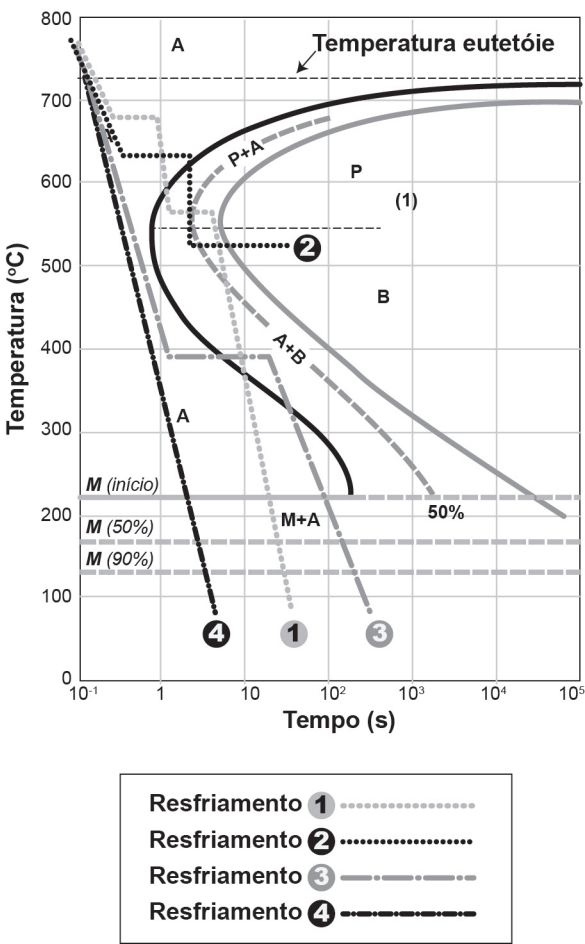


Figura 8.13

Resposta comentada

Resfriamento 1: o resfriamento atinge o início da transformação perlítica e, antes de atingir o seu fim, há um resfriamento brusco fazendo com que a austenita, que ainda não se transformou em perlita, transforme-se em martensita. Microestrutura final: perlita + martensita.

Resfriamento 2: o resfriamento atinge o início da transformação perlítica e, antes de atingir o seu fim, há um resfriamento brusco, até uma temperatura abaixo do “cotovelo” da curva TTT, fazendo com que a austenita, que ainda não se transformou em perlita, transforme-se em bainita. Microestrutura final: perlita + bainita.

Resfriamento 3: o resfriamento é rápido o suficiente para ultrapassar o “cotovelo” da curva e atingir o início da transformação bainítica. Antes de atingir o seu fim, há um novo resfriamento, fazendo com que a austenita, que ainda não se transformou em bainita, transforme-se em martensita. Microestrutura final: bainita + martensita.

Resfriamento 4: o resfriamento é rápido o suficiente para pular a transformação perlítica e a bainítica, fazendo com que toda austenita se transforme em martensita. Microestrutura final: martensita.

Curvas de resfriamento contínuo

A maioria dos tratamentos térmicos realizados nos aços é conduzido de forma que as peças sejam resfriadas com perda contínua de calor ao longo do tempo. Neste caso, as curvas TTT não se aplicam, uma vez que o seu conceito foi baseado em uma transformação isotérmica. A esses diagramas chamamos de diagramas C.C.T (curva de transformação com resfriamento contínuo). Geralmente, o resfriamento contínuo desloca o início da transformação da Austenita para temperaturas inferiores e para tempos maiores, como podemos observar na **Figura 8.14**.

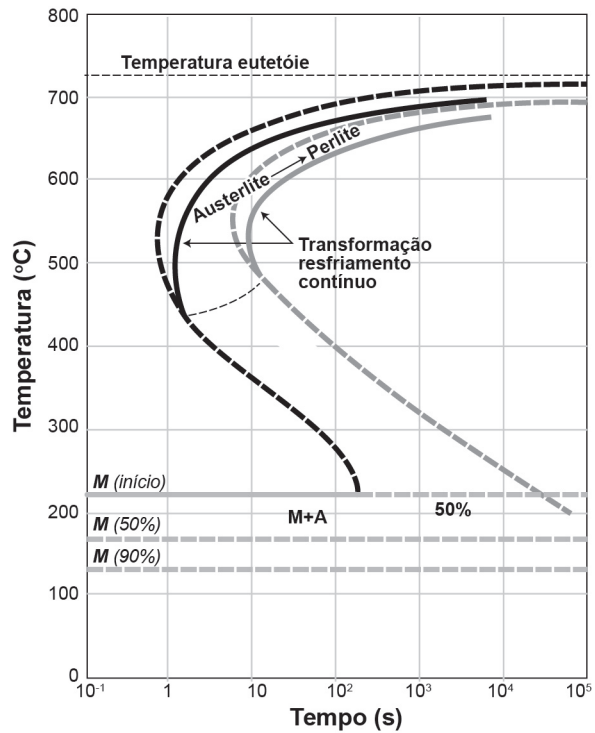


Figura 8.14: curva de resfriamento contínuo de uma liga Fe-C eutetoide.

Na **Figura 8.14**, temos as duas curvas: a TTT pontilhada e a CCT contínua, para uma transformação eutetoide. Podemos observar que a CCT é deslocada para a direita, o que significa que ela representa a transformação eutetoide em tempos mais longos.

Na **Figura 8.15**, podemos observar como as taxas de resfriamento influenciam na microestrutura final.

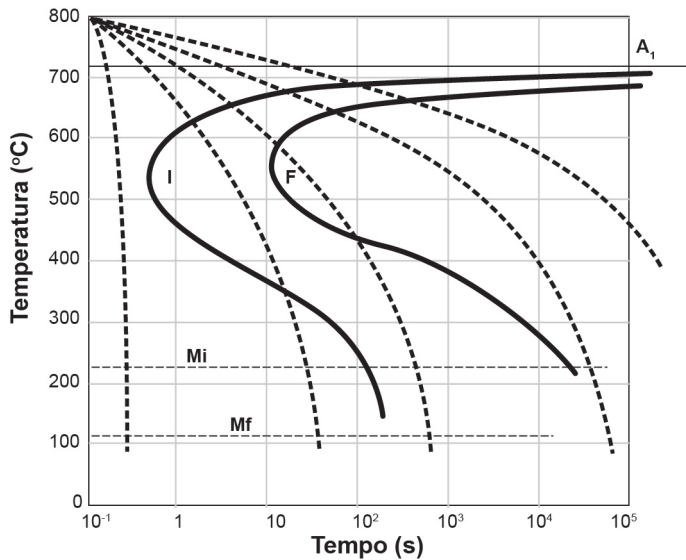


Figura 8.15: curva de resfriamento contínuo de uma liga Fe-C eutetóide, exemplificando resfriamentos com taxas variadas.

A **Figura 8.15** mostra resfriamentos com taxas diferentes. O resfriamento A é lento (resfria dentro do forno de aquecimento) e sua microestrutura final é uma Perlita grossa.

Um resfriamento um pouco mais rápido, ao ar, resulta em uma microestrutura de Perlita fina (resfriamento B).

No resfriamento C, o resfriamento é ainda mais rápido do que em B (ar soprado), mas a transformação teve início e fim antes do “cotovelo” da curva, então a microestrutura ainda é de Perlita, porém mais fina da que se obteve em B.

No resfriamento relativo à curva D, podemos observar que a curva de resfriamento (pontilhada) atravessa o início da curva de transformação perlítica, mas não chega até a curva de término da transformação perlítica. Isso significa que parte da microestrutura é perlítica e parte será martensítica, porque antes de terminar a transformação em Perlita o resfriamento atingiu a temperatura de início da transformação da Austenita em Martensita.

No resfriamento relativo à curva E, a taxa de resfriamento foi rápida o suficiente para impedir o início da transformação perlítica e atinge-se a temperatura de transformação martensítica. Desta forma, a microestrutura final será toda Martensítica.

Atividade 3

Atende ao objetivo 2

Para um diagrama de resfriamento contínuo (CCT) de uma liga Fe-0.30%C, identifique as microestruturas resultantes.

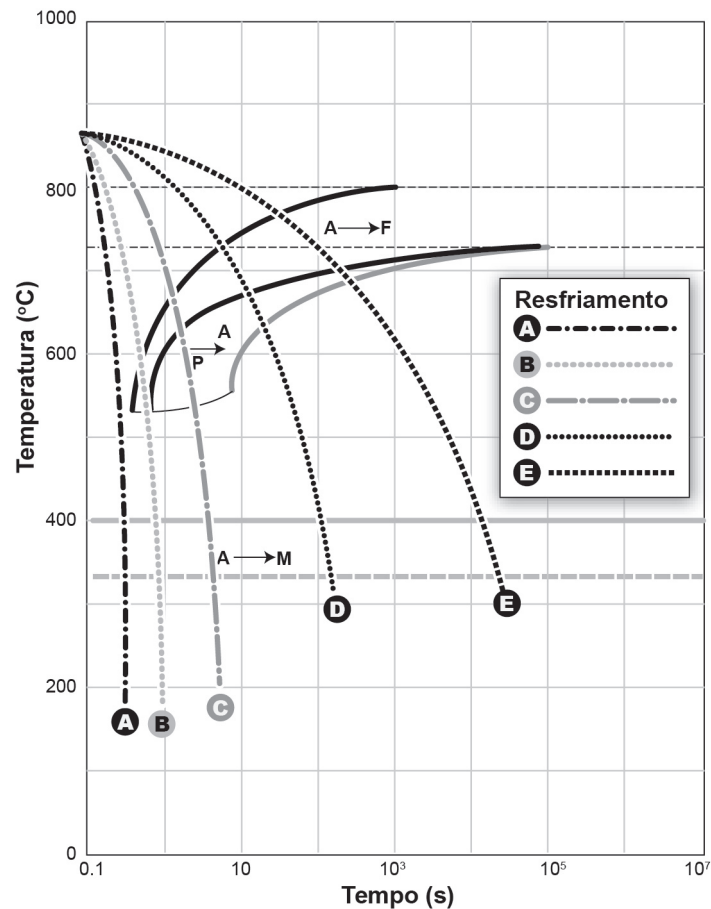


Figura 8.16

Resposta comentada

Resfriamento A: a taxa de resfriamento é rápida o suficiente para evitar que a Austenita se transforme em Ferrita pró-eutetoide e Perlita, atingindo a temperatura de transformação martensítica. Microestrutura final: Martensita.

Resfriamento B: a taxa de resfriamento é rápida, mas antes de atingir a temperatura de transformação martensítica, passa pelo campo de trans-

formação da Austenita em Ferrita pró-eutetoide, embora não atinja o início da transformação Perlitica. Portanto, a Austenita que não se transformou em Ferrita se transforma em Martensita. Microestrutura final: Ferrita + Martensita.

Resfriamento C: o resfriamento atinge o campo de transformação da Austenita em Ferrita e logo atinge o início da transformação perlítica, mas não atinge o fim da transformação perlítica, pois antes atinge a temperatura de transformação martensítica. Microestrutura final: Ferrita + Perlita + Martensita.

Resfriamento D: o resfriamento atinge o campo de transformação da Austenita em Ferrita e logo atinge o início da transformação perlítica, prosseguindo até atingir o fim da transformação perlítica. Microestrutura final: Ferrita + Perlita fina.

Resfriamento E: o resfriamento atinge o campo de transformação da Austenita em Ferrita e logo atinge o início da transformação perlítica, prosseguindo até atingir o fim da transformação perlítica, mas com uma taxa de resfriamento mais lenta, resultando em Perlita grosseira. Microestrutura final: Ferrita + Perlita grossa.

Conclusão

O estudo das transformações de fases é importante, uma vez que as propriedades dos materiais estão relacionadas à microestrutura. A microestrutura pode ser alterada em função da taxa de resfriamento, dando origem a microestruturas estáveis, aquelas previstas no diagrama de fases; e a microestruturas metaestáveis, não previstas no diagrama de fases. Microestruturas *estáveis* são aquelas que surgem com o resfriamento dentro das condições de equilíbrio termodinâmico. Como exemplos, temos a Ferrita, Cementita e Perlita, que aparecem no diagrama ferro-carbono. Já as metaestáveis são aquelas que não aparecem no diagrama de equilíbrio, porque só aparecem quando o resfriamento ocorre fora do equilíbrio termodinâmico. Como exemplos, temos a Bainita e a Martensita, que ocorrem em ligas Fe-C.

Se você observar dois aços, não é possível saber a olho nu a sua microestrutura. Mas através de suas propriedades, podemos prever qual

é a microestrutura do material. Isso porque cada microestrutura tem suas propriedades mecânicas e as transfere para o material. Cada diferente microestrutura irá favorecer diferentes tipos de uso dos metais na indústria, proporcionando a diversidade de bens de consumo para atender as demandas cada vez mais crescentes da nossa sociedade.

Resumo

Após o término dessa aula, podemos concluir que:

- as transformações de fase podem ser divididas em: transformações com difusão atômica e sem difusão atômica;
- as transformações com difusão atômica se dividem em dois tipos: transformação em que não existe mudança na quantidade e na composição das fases e transformações em que existem variações na quantidade e/ou na composição das fases;
- na transformação sem difusão atômica, há a formação de uma fase metaestável, ou seja, suas propriedades ou características mudam lentamente com o tempo, e o estado de equilíbrio não é nunca alcançado. No entanto, não há mudanças muito perceptíveis com o tempo na microestrutura das fases metaestáveis;
- a transformação dependente da difusão atômica é necessariamente dependente do tempo e por isso estuda-se a cinética de transformação;
- a transformação de fase se divide em dois estágios distintos: nucleação e crescimento;
- a nucleação consiste no surgimento de núcleos ou partículas muito pequenas da nova fase que, na maioria dos casos, em consequência da difusão, ocasiona o crescimento desses novos grãos, com o passar do tempo;
- no crescimento, os núcleos aumentam até se tornarem parcial ou totalmente a nova fase, ou seja, até que se atinja o equilíbrio termodinâmico;
- os diagramas TTT auxiliam na correlação entre tempo e temperatura para ocorrer uma transformação de fase e determinar qual a microestrutura final.
- a curva TTT é gerada a partir das curvas de cinética em diversas temperaturas.

- em ligas de Fe-C, a partir da curva TTT, podemos estudar o tratamento isotérmico e observar como a Austenita se transforma, em função da taxa de transformação;
- a Austenita pode se transformar em Perlita, Bainita e Martensita;
- a maioria dos tratamentos térmicos realizados nos aços é conduzida de forma que as peças sejam resfriadas com perda contínua de calor ao longo do tempo. Neste caso, as curvas TTT não se aplicam, uma vez que o seu conceito foi baseado em uma transformação isotérmica. A esses diagramas chamamos de diagramas C.C.T.

Informações sobre a próxima aula

Na nossa última aula, vamos estudar sobre fratura, fadiga e fluência. Na próxima aula, estudaremos como ocorre a ruptura dos materiais.

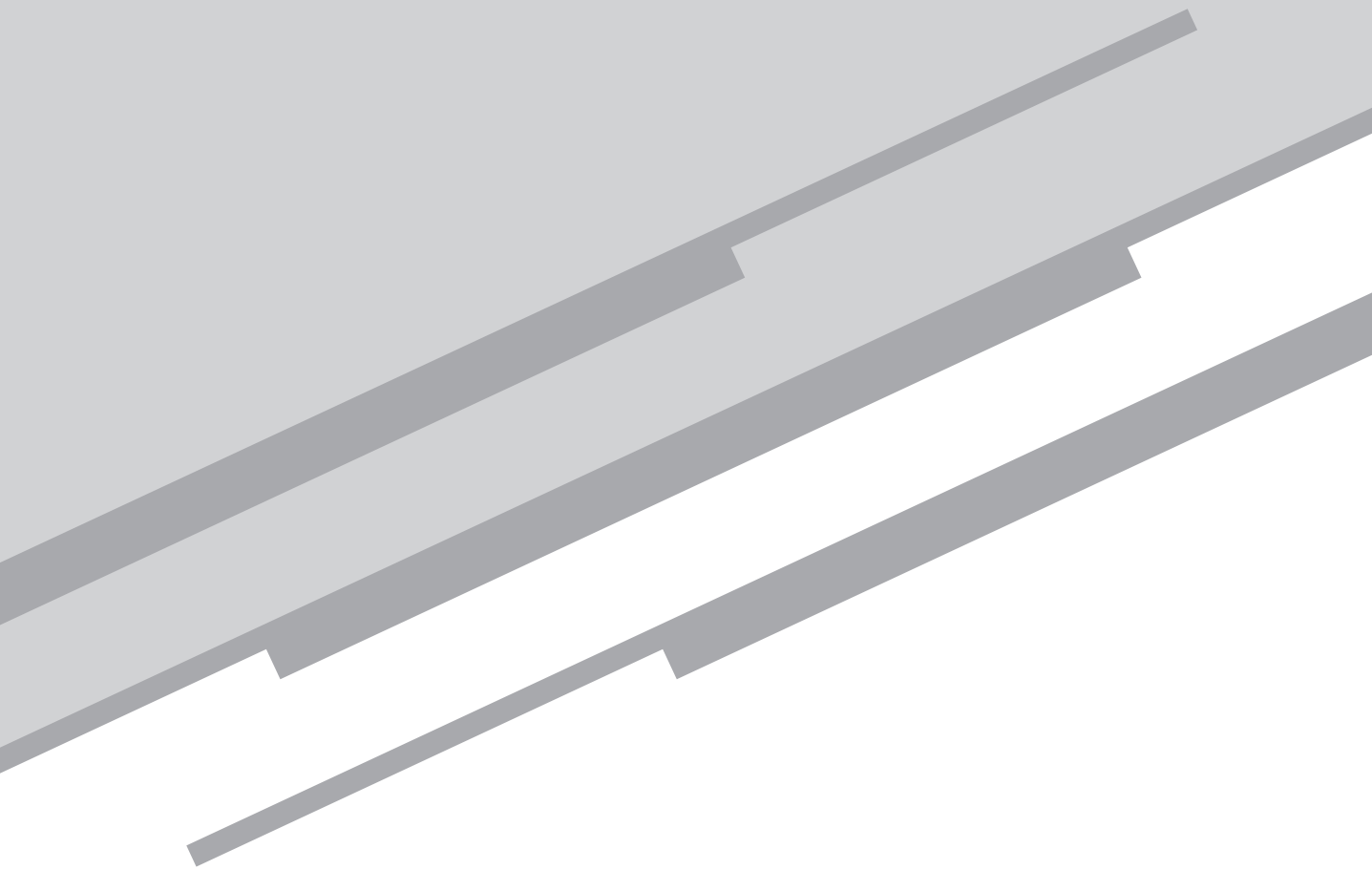
Referências

CALLISTER JR, Willian D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

VAN VLACK, Laurence H. *Princípios de ciência e tecnologia dos materiais*. São Paulo: Blucher, 1970.

Aula 9

Fratura, Fadiga, Fluência



Nadja Valéria Vasconcellos de Ávila

Metas

Conceituar os tipos de fraturas que podem ocorrer nos materiais e apresentar os motivos que levam um material a falhar por fadiga ou por fluência.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. diferenciar fratura dúctil e frágil;
2. identificar fadiga;
3. identificar fluência.

Pré-requisitos

Antes de iniciar essa aula, faça uma revisão da Aula 3, sobre propriedades mecânicas dos materiais.

Introdução

Você já ouviu falar da Tacoma Narrows Bridge? Essa ponte tem uma história incrível para nos contar! Construída no ano de 1940, na capital dos EUA, após fortes rajadas de vento, que chegaram a uma velocidade de aproximadamente 70 km/h, ela entrou em colapso, ficando completamente destruída.

Ainda hoje existem controvérsias sobre o fenômeno científico que causou sua fissura. Entretanto, sabemos que esse desastre em Tacoma serve como exemplo prático da ação da fadiga sobre uma estrutura.

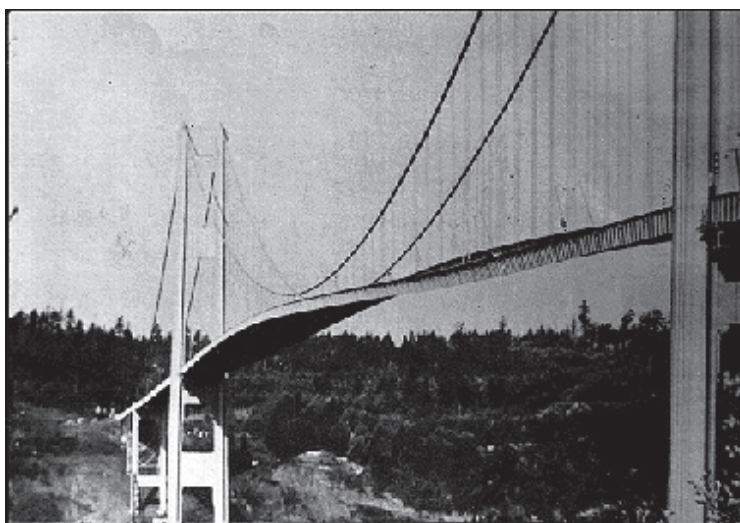


Figura 9.1: Tacoma Narrows Bridge. Washington DC (1940).

Fonte: <https://goo.gl/xWqt3q>.

O objetivo desta aula é apresentar de forma compacta e simplificada os conceitos fundamentais relacionados à fratura, fadiga e fluência. Existem situações de trabalho que podem levar à fratura do componente inesperadamente e em tensões bem abaixo daquelas previstas em um ensaio de tração. Nesta aula, vamos mostrar por que e como isso acontece.

Fratura

Consiste na separação do material em duas ou mais partes, quando submetido a um esforço mecânico. Já vimos, na Aula 3, que os esforços mecânicos podem ser de tração, compressão, cisalhamento ou torção.

Cargas trativas uniaxiais

Aplicação de forças, no sentido de tracionar o material em uma única direção.

Microcavidades

Material ausente, em tamanho muito pequeno, que pode ou não ser observados a olho nu.

Vamos restringir a discussão a fraturas devido a **cargas trativas uniaxiais**.

O processo de fratura ocorre em dois formatos diferentes: fratura *dúctil* e fratura *frágil*, de acordo com o tipo de formação e propagação de trincas, em resposta a imposição de uma tensão. Ou seja, o modo da fratura é dependente do mecanismo de propagação de trincas.

A fratura dúctil ocorre apenas após extensa deformação plástica e se caracteriza pela propagação lenta de trincas, resultantes da nucleação e do crescimento de **microcavidades**.

A fratura frágil ocorre pela propagação rápida de trincas, acompanhada de pouca ou nenhuma deformação plástica.

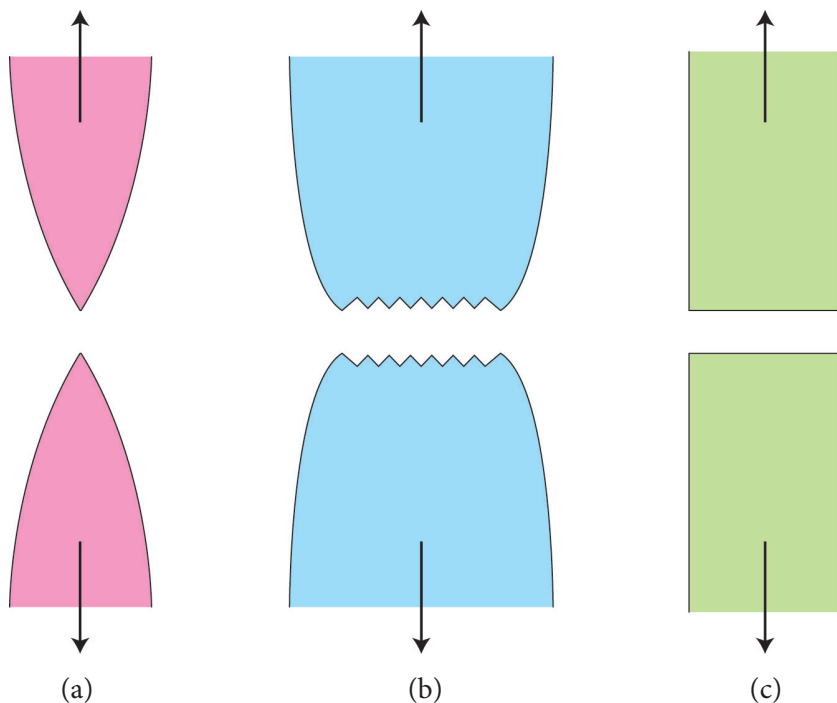


Figura 9.2: (a) Fratura muito dúctil; (b) fratura dúctil; (c) fratura frágil.

Estricção

Encolhimento da área da seção transversal (*empescoamento*) em um corpo de prova ou outra estrutura metálica sujeita à tração, que ocorre a partir do limite de resistência. A tensão se concentra nessa região, levando à fratura.

A **Figura 9.2** mostra os possíveis aspectos macroscópicos das fraturas. Na **Figura 9.2 (a)** temos uma fratura característica de materiais altamente dúcteis, pois sofrem uma **estricção** até uma fratura pontual.



Estricção

No vídeo a seguir, mostramos como ocorre a estricção. Ficou curioso? Então clique no link: https://youtu.be/6JENBM7u_i8?t=10m39s.

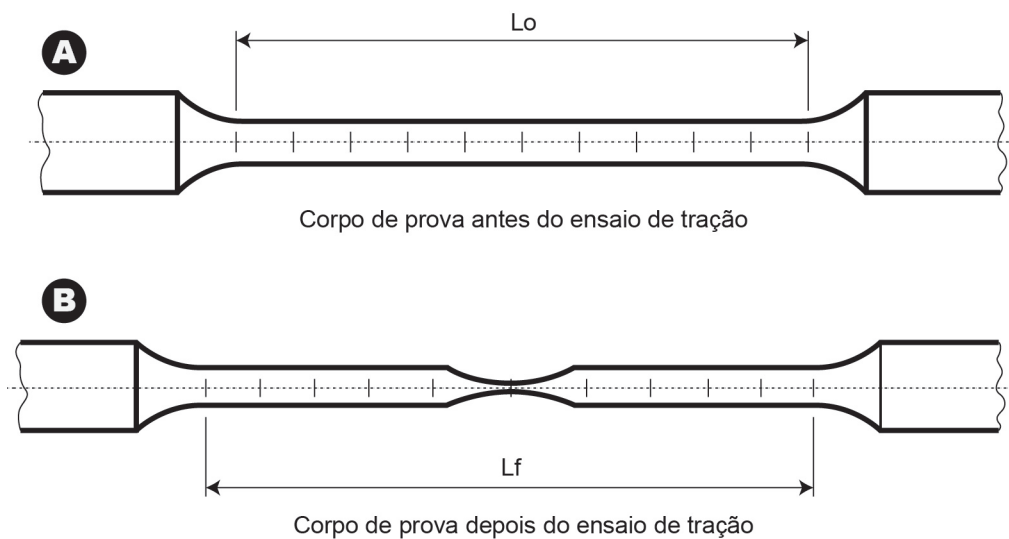


Figura 9.3: Corpo de prova típico para ensaio de tração: (a) antes da ocorrência da estricção; (b) após a ocorrência da estricção.

Entre os materiais altamente dúcteis, podemos exemplificar o ouro e chumbo puros a temperatura ambiente, polímeros e vidros em temperatura elevada. Na **Figura 9.4 (b)** temos uma fratura moderadamente dúctil que ocorre após alguma estricção. O processo de fratura ocorre em alguns estágios, como podemos observar na **Figura 9.4**.

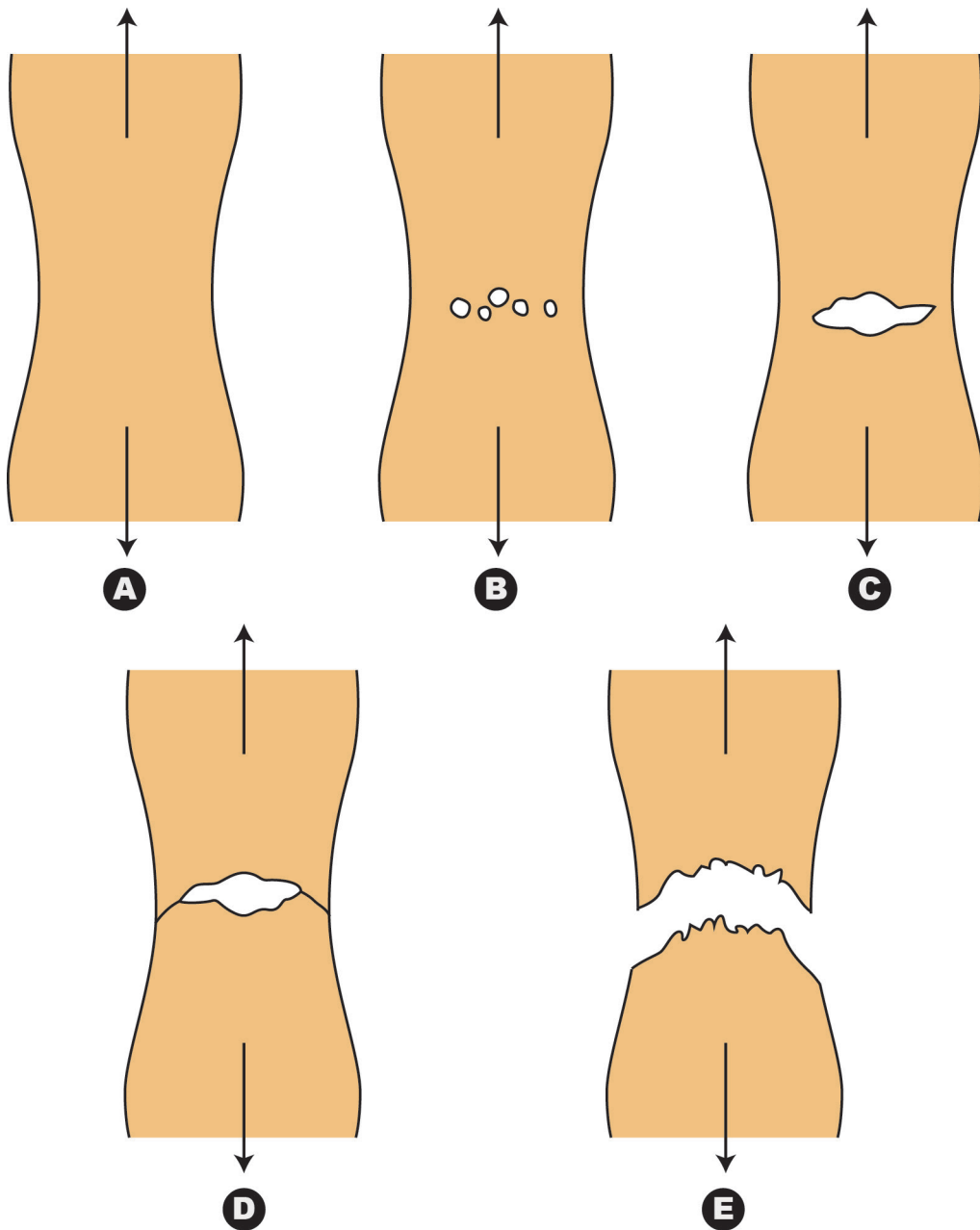


Figura 9.4: Estágios de formação de uma fratura dúctil: (a) empescoçamento inicial (início da estricção); (b) formação de pequenos vazios; (c) coalescência (união) dos pequenos vazios formando uma trinca (abertura) elíptica; (d) propagação da trinca ao redor do perímetro externo do “pescoço”; (e) fratura.

Na **Figura 9.4 (C)**, temos o aspecto macroscópico de uma fratura frágil. Ela ocorre sem qualquer deformação aparente e pela rápida propagação de uma trinca. A direção de movimento da trinca é aproximadamente perpendicular à direção da tensão aplicada, apresentando uma superfície de fratura praticamente plana.

Atividade 1

Atende ao objetivo 1

No que diz respeito à fratura dos materiais, julgue as duas afirmações abaixo.

- a) O processo de fratura envolve a formação e a propagação de trincas em resposta a uma tensão aplicada.
- b) O efeito de um concentrador de tensões é mais significativo nos materiais dúcteis do que nos materiais frágeis.

Resposta comentada

- a) Sim. O processo de fratura ocorre em dois formatos diferentes: fratura dúctil e fratura frágil, de acordo com o tipo de formação e propagação de trincas em resposta à imposição de uma tensão. Ou seja, o modo da fratura é dependente do mecanismo de propagação de trincas.
- b) Não. A fratura dúctil ocorre apenas após extensa deformação plástica e se caracteriza pela propagação lenta de trincas resultantes da nucleação e do crescimento de microcavidades. Já a fratura frágil ocorre pela propagação rápida de trincas, acompanhada de pouca ou nenhuma deformação plástica.

Fadiga

A fadiga pode ser definida como sendo um processo que causa falha prematura ou dano permanente a um componente sujeito a carregamentos repetitivos (cíclicos).

Formalmente, podemos definir a fadiga como sendo a ruptura ou falha de um componente devido à propagação de uma fissura (trinca) gerada pela aplicação de tensões cíclicas, ou seja, carregamentos repetitivos, dinâmicos e variáveis. Podemos exemplificar com situações

práticas do dia-a-dia: o carregamento e descarregamento de um eixo de transmissão de automóvel, a compressão e a descompressão de um avião, as vibrações sentidas por uma ponte, como a Tacoma Narrows Bridge sentiu, durante o seu processo de desabamento, por exemplo. Nessa situação, a falha pode acontecer sob a aplicação de uma tensão menor ao limite de resistência à tração e até mesmo abaixo do limite de escoamento, quando o material é submetido a cargas estáticas.



O colapso da Tacoma Narrows Bridge

No link abaixo, você poderá conferir o exato momento do colapso da Tacoma Narrows Bridge. Felizmente, não houve vítimas desse incrível acidente.

Acesse: https://www.youtube.com/watch?v=PCRYQvnc_88.

Tipos de carregamento

O tipo de carregamento está diretamente relacionado ao comportamento das tensões cíclicas, em função do tempo. Vale lembrar que as tensões podem ser de natureza axial (tração ou compressão), de flexão ou de torção. Então podemos definir três tipos de carregamento:

- a) as tensões máxima e mínima possuem mesma magnitude, e a relação com o tempo é regular e senoidal, conforme podemos observar na **Figura 9.5 (a)**. Esse tipo é denominado como *ciclos de tensões alternadas*.
- b) As tensões máxima e mínima não possuem a mesma magnitude, mas a relação com o tempo é regular e senoidal, conforme podemos observar na **Figura 9.5 (b)**. Esse tipo é denominado como *ciclos de tensões repetidas*.
- c) A tensão pode variar aleatoriamente com o tempo e é conhecida por *ciclos de tensões variadas*, conforme podemos observar na **Figura 9.5 (c)**.

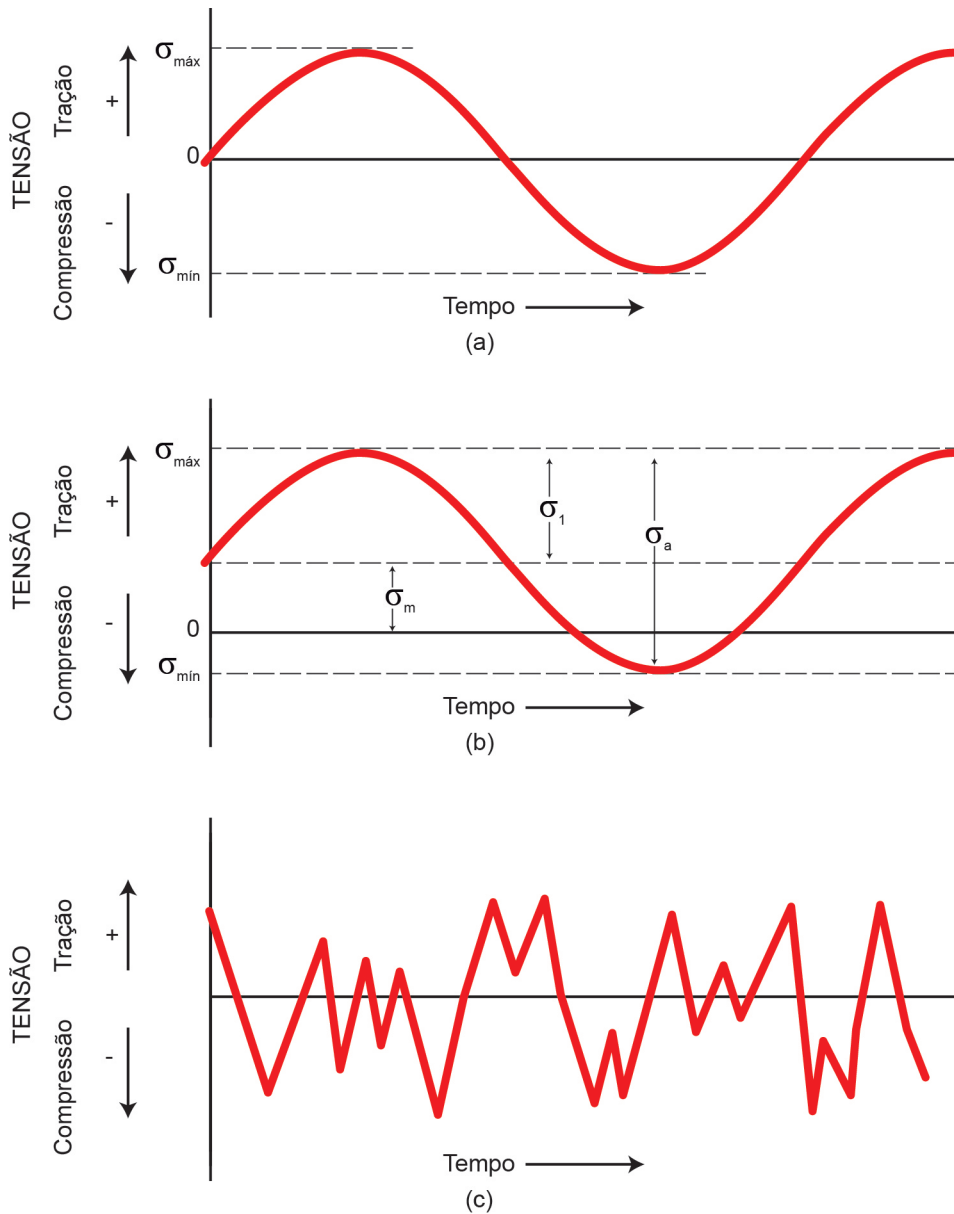


Figura 9.5: Tipos de carregamento em fadiga: (a) ciclos alternados; (b) ciclos repetidos; (c) ciclos variados.

Podemos observar também, na **Figura 9.5(b)**, parâmetros utilizados para caracterizar ciclos de tensões variáveis. Observe, a seguir, como se comporta cada um desses parâmetros.

Tensão média (σ_m): média das tensões máxima e mínima.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2}$$

Intervalo de tensões (σ_i): a diferença entre tensão máxima e mínima.

$$\sigma_i = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}$$

Amplitude de tensão (σ_a): metade do intervalo de tensões.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2}$$

Razão de tensões (R): razão entre amplitudes de tensões máxima e mínima.

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}}$$

===== **Atividade 2** =====

Atende ao objetivo 2

Observe o gráfico abaixo e calcule o valor da tensão média, do intervalo de tensões, da amplitude de tensão e da razão de tensões.

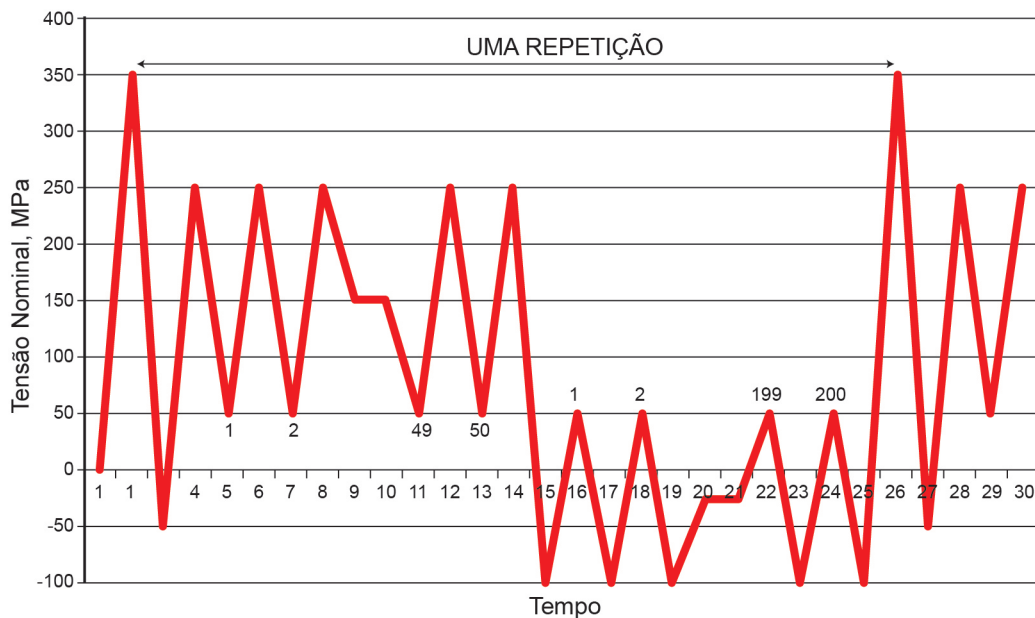


Figura 9.6: Curva tensão (MPa) x tempo (dias) de um aço submetido a carregamento cíclico.

Resposta comentada

Tensão média:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{350 + (-100)}{2} = 125 MPa$$

Intervalo de tensões:

$$\sigma_i = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} = 350 - (-100) = 450 MPa$$

Amplitude de tensão:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{350 - (-100)}{2} = 225 MPa$$

Razão de tensões:

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} = \frac{100}{450} = 0,28$$

Curva S-N

O comportamento de um material sob fadiga é descrito por curvas S-N, em que S é a tensão e N é o número de ciclos para a falha. Estas curvas também são conhecidas por *Curvas de Wöhler*.

Para obtê-las, é necessária a realização de ensaios com aplicação de **carga cíclica** em *corpo-de-prova* apropriado e padronizado. Estes ensaios são capazes de fornecer dados quantitativos quanto às características de um material ou componente suportar por longos períodos, cargas repetitivas e/ou cíclicas sem se romper.

Em alguns materiais, pode-se observar um limite de fadiga (**Figura 9.7(a)**), o qual representa um nível de tensão abaixo do qual o material não falha. Isso significa que *se o material for carregado ciclicamente abaixo desse valor, ele nunca falhará por fadiga* (e ele pode ser carregado ciclicamente indefinidamente).

Entretanto, existem materiais em que esse limite de fadiga não pode ser observado. Então, pode-se determinar, para uma dada tensão, quantos ciclos ele suporta antes de romper (**Figura 9.7(b)**).

Carga cíclica

Tensão ou carga que se alterna entre um máximo e um mínimo de mesma intensidade.

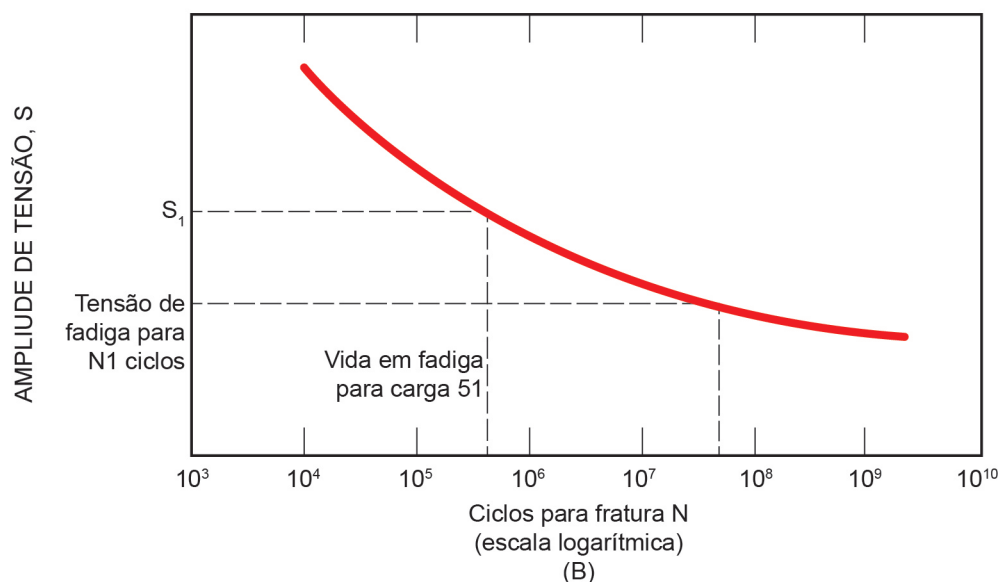
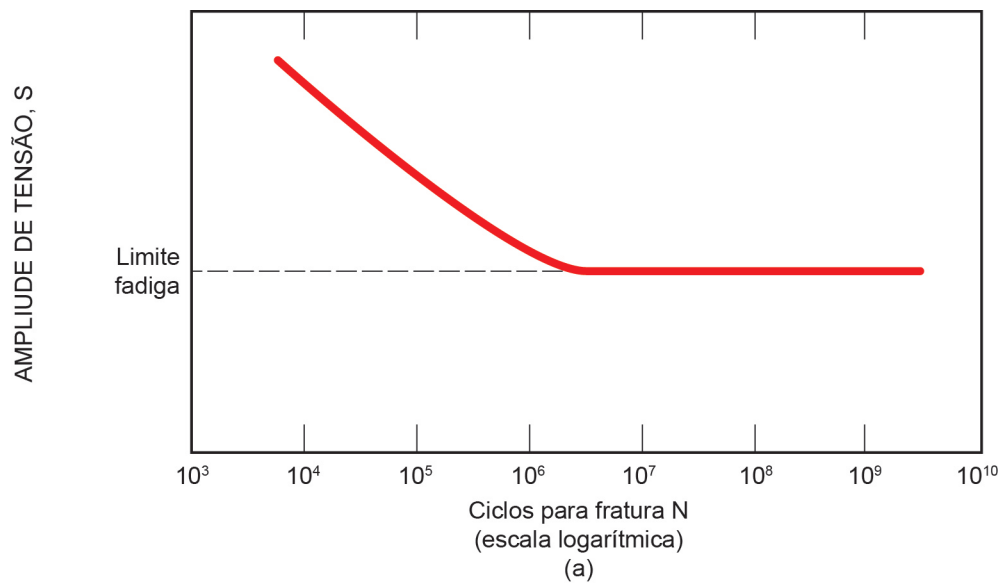


Figura 9.7: Curva S-N genérica. (a) material que apresenta limite de fadiga; (b) material que não apresenta limite de fadiga. Observe que na Figura 9.7 (a) a partir de uma quantidade de ciclos a tensão passa a ser constante. Isso significa que, se o material for usado abaixo dessa tensão, ele não romperá por fadiga. Já na Figura 9.7 (b), temos um material que terá uma certa quantidade de ciclos quando usado em uma dada tensão. Os dois pontos em destaque mostram duas situações distintas para um mesmo material. Em uma determinada tensão S_1 , temos um número de ciclos limite para uso em condições de fadiga. Para um dado número de ciclos N_1 , temos uma tensão máxima que o material irá suportar em fadiga.

Estar em serviço

Aplicação de cargas cíclicas sobre o componente. Por exemplo, a Tacoma Narrows Bridge, ao ser liberada para passagem de carros, está em serviço.

A ruptura de um componente **em serviço** ocorre em três etapas distintas:

- nucleação da trinca: a trinca se forma em algum ponto de concentração de tensões.
- propagação cíclica da trinca (fenômeno lento): propagação gradual da trinca a cada ciclo de tensões.
- falha catastrófica (fenômeno rápido): separação ou ruptura após a trinca ter alcançado um tamanho crítico.

A vida total em fadiga é dada por:

$$N_f = N_i + N_p$$

Em que:

N_i : número de ciclos para iniciação

N_p : número de ciclos para a propagação.

O tempo consumido na ruptura ou estágio final é desprezado em relação a N_i e N_p .

Para baixas tensões de carregamento (fadiga de alto ciclo), $N_i > N_p$. Para altas tensões de carregamento (fadiga de baixo ciclo), $N_p > N_i$. Ou seja, para baixas tensões de carregamento (fadiga de alto ciclo), o número de ciclos para a iniciação ou formação da trinca é maior que o número de ciclos para a propagação da trinca. Já para altas tensões de carregamento (fadiga de baixo ciclo), o número de ciclos para a propagação da trinca é maior que o número de ciclos para a iniciação ou formação da trinca. A falha ou ruptura de um componente ocorre quando surge uma trinca e essa trinca se propaga (aumenta de tamanho) quando há aplicação de carga ou tensão.

As trincas são normalmente iniciadas na superfície (ranhuras, pequenas trincas de usinagem, mal acabamento superficial) ou em pontos de concentração de tensões como: inclusões, porosidade acentuada, defeitos de solidificação, pontos de corrosão.

Na aplicação real dos materiais em construção das máquinas muitos são os fatores que afetam a vida em fadiga. Podemos considerar os expostos a seguir:

- acabamento superficial: quanto melhor for o acabamento superficial, ou melhor, *quanto mais liso estiver o componente, maior será a resistência à fadiga*.
- tamanho da peça: quanto maior é o componente, menor é a sua resistência à fadiga. De uma maneira mais simples, pode-se associar a

influência do tamanho da peça na vida em fadiga, simplesmente, considerando o efeito do acabamento superficial. Assim, *é possível imaginar a diminuição da resistência à fadiga com o aumento da dimensão do componente.*

c) temperatura: considerando temperaturas abaixo da ambiente, observa-se que os metais apresentam um aumento na sua resistência à fadiga com o decréscimo da temperatura. *Para mais altas temperaturas, a deformação plástica que é um fator extremamente importante em fadiga, torna-se mais intensa, diminuindo a vida em fadiga.*

d) concentração de tensões: todas as descontinuidades tais como entalhes, furos e ranhuras *modificam a distribuição de tensões, acarretando em um aumento de tensões localizadas.* Com este aumento de tensão localizado, o carregamento torna-se mais severo, diminuindo a vida em fadiga do material.

e) efeitos microestruturais: *o comportamento em fadiga dos aços é uma função da microestrutura apresentada, bem como do nível de inclusões não metálicas presentes.*



Ensaaios de fadiga

Clique no *link* abaixo para assistir a um vídeo sobre ensaios de fadiga. Esse vídeo é bem completo, então você poderá utilizá-lo para testar se você entendeu mesmo a matéria! Acesse: <https://goo.gl/1vMV2I>.

Atividade 3

Atende ao objetivo 2

A fadiga é classificada como um tipo de falha que ocorre em materiais submetidos a tensões cíclicas. Nessas circunstâncias, é possível que o material sofra uma fratura sob uma tensão inferior ao limite de escoamento.

A resistência à fadiga é sensível em relação a algumas variáveis. Considerando um projeto de um sistema mecânico, essas variáveis incluem:

- I. geometria.
- II. temperatura.
- III. acabamento superficial.
- IV. composição química do meio.

É correto o que se afirma em:

- (a) I e II, apenas;
- (b) III e IV, apenas;
- (c) I, II e III, apenas;
- (d) II, III e IV, apenas;
- (e) I, II, III e IV.

Resposta comentada

A resposta correta é d: a geometria não influencia na fluência, e sim o tamanho da peça.

Fluência

Já sabemos que todo corpo submetido a um esforço externo apresenta inicialmente uma deformação elástica, depois uma deformação permanente, até que haja o seu rompimento. Verificamos que há sempre uma quantidade de esforço que não produz deformação permanente. Se o esforço é aliviado neste estágio, as dimensões da peça voltam ao original.

Aí você poderia me perguntar: “então, se aplicarmos uma tensão estática na faixa de deformação elástica, esse corpo nunca vai se romper?”. A resposta seria: sim, se não existisse o fenômeno da fluência.

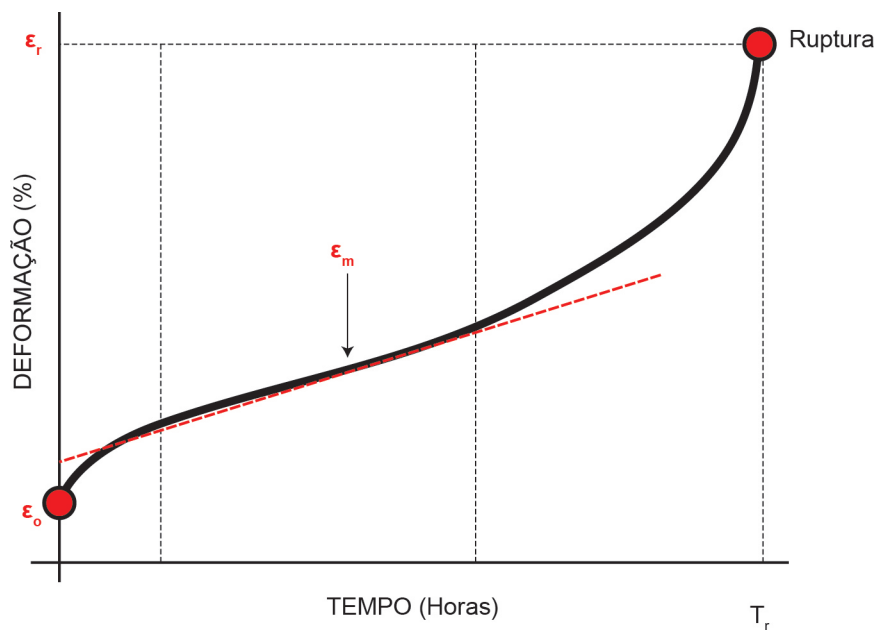
Fluência é um fenômeno de deformação lenta, sob ação de uma carga constante, aplicada durante um longo período de tempo, a uma temperatura superior a 0,4 vezes a temperatura de fusão em Kelvin.

Na seção a seguir, observaremos como ocorre o comportamento de um material em fluência, através de um ensaio de fluência. Vamos lá?

3.1 Comportamento em fluência

Para estabelecermos o comportamento de um material em relação à fluência é preciso realizar um ensaio de fluência.

Neste ensaio, um corpo de prova é submetido a uma carga ou tensão constante, mantendo-se a temperatura constante. O alongamento do corpo é medido em função do tempo decorrido. A **Figura 9.8** mostra esquematicamente o comportamento típico dos metais para a fluência sob uma carga constante, ou seja, *mostra o progresso da deformação em função do tempo*, que, neste caso, pode durar horas.



- 1 - Estágio primário
- 2 - Estágio secundário ou estacionário
- ϵ_o = Alongamento inicial
- ϵ_r = Alongamento final
- ϵ_m = Taxa estacionária de fluência ou taxa mínima de fluência
- T_r = Tempo de ruptura

Figura 9.8: Comportamento típico de um material sob fluência. As variáveis ϵ_o , ϵ_r representam os alongamentos inicial e final, e ϵ_m representa a taxa estacionária de fluência; a variável t_r representa o tempo de ruptura e os números de 1 a 3 representam os estágios de fluência pelos quais o corpo passa durante o experimento.

Agora examinaremos cada um dos estágios separadamente.

Estágio primário: ocorre um decréscimo contínuo na taxa de fluência ($\epsilon = d\epsilon/dt$), ou seja, *a inclinação da curva diminui com o tempo devido ao aumento da resistência por encruamento*. Essa inclinação diminuindo pode ser observada na parte 1 da **Figura 9.8**.

Estágio secundário: a taxa de fluência ($\epsilon = d\epsilon/dt$) é constante (comportamento linear). A inclinação da curva constante com o tempo é devido a dois fenômenos competitivos: encruamento e **recuperação**. O valor médio da taxa de fluência nesse estágio é chamado de taxa mínima de fluência (ϵ_m), que é um dos parâmetros mais importantes a se considerar em projetos de componentes em que se deseja vida longa.

Estágio terciário: ocorre uma aceleração na taxa de fluência ($\epsilon = d\epsilon/dt$) que culmina com a ruptura do corpo de prova. A ruptura ocorre com a separação dos contornos de grão, formação e **coalescimento** de trincas, conduzindo a uma redução da área localizada e consequente aumento da taxa de deformação.

O parâmetro mais importante é o estágio secundário, que pode ser chamado de *taxa de influência mínima* ou *taxa de fluência estacionária*, e é esse parâmetro que é levado em consideração em projetos de engenharia, em componentes que terão aplicação de carga em longo prazo, em altas temperaturas. Como a derivada da deformação com o tempo é constante, significa o intervalo de tempo onde o componente não vai romper devido à fluência.

Encruamento

Elevação da tensão de escoamento na fase de deformação plástica, ou seja, fenômeno que ocorre no metal com aumento da dureza devido à deformação plástica a frio.

Recuperação

Processo que depende do tempo e, embora não mude a microestrutura, restaura parcialmente a maciez (menor resistência e maior ductilidade) após o encruamento.

Coalescimento

Junção de partes que se encontravam separadas.



Ensaio de Fluência

Querido aluno, separamos para você um vídeo bem bacana sobre ensaios de fluência. Esses ensaios geralmente são realizados quando se deseja descobrir qual ou quais materiais são os mais indicados para a construção de um determinado objeto ou máquina, como um avião, por exemplo.

Confira o vídeo no link a seguir: <https://goo.gl/AzQQiD>.

Fatores que afetam a fluência

Três fatores afetam diretamente a fluência. São eles:

- tensão
- temperatura
- tamanho do grão

Vamos abordar cada um deles separadamente, para que você perceba como essa influência funciona.

Tensão e temperatura: tanto a temperatura quanto o nível de tensão aplicada influenciam nas características da fluência, como podemos observar na **Figura 9.9**.

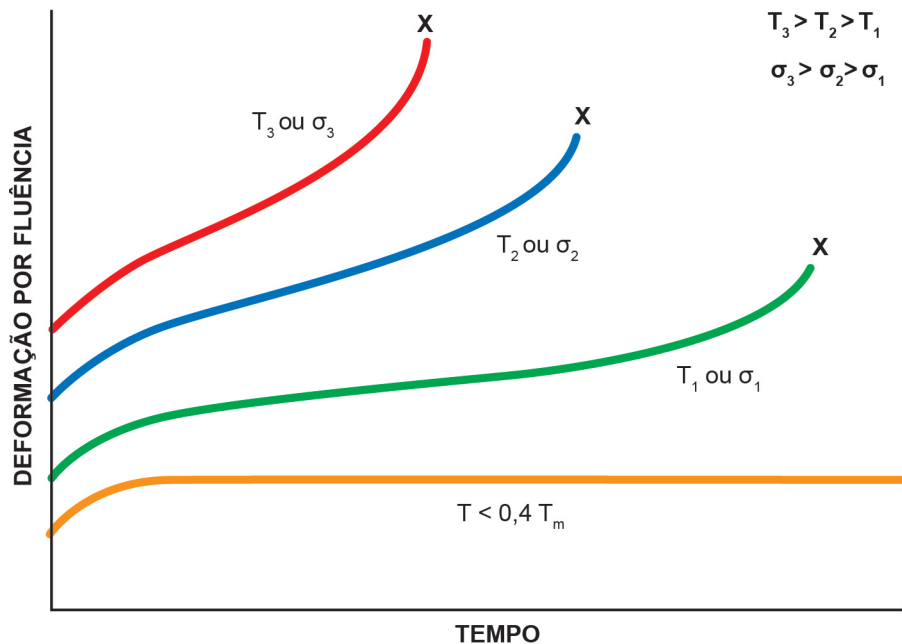


Figura 9.9: Influência da tensão e da temperatura sobre o comportamento da fluência. T representa temperaturas aleatórias, onde $T_3 > T_2 > T_1$. σ representa tensões aleatórias, onde $\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$.

O gráfico da **Figura 9.8** nos mostra que o aumento da temperatura de trabalho ou da tensão aplicada diminuem a vida em fluência do componente.

Para temperaturas abaixo de 0,4 da temperatura de fusão do material (T_m no gráfico da **Figura 9.8**) e após uma deformação inicial, a deformação é independente do tempo. Se houver um aumento da temperatura ou da tensão aplicada, poderemos observar que:

- a deformação no momento de aplicação da tensão aumenta;
- a taxa de fluência estacionária aumenta;
- o tempo de vida até a ruptura diminui.



Atenção! A partir de agora, vamos nos referir a temperaturas baixas como *temperaturas ambientes*, porque as temperaturas do gráfico da **Figura 9.8** são temperaturas da ordem de 50% da temperatura de fusão e, por isso, a temperatura ambiente é baixa em relação às temperaturas que influenciam na ocorrência da fluência. Portanto, qualquer que seja a temperatura ambiente, ela será baixa.

Tamanho de grão: Já vimos em aulas anteriores que, para baixas temperaturas (temperatura ambiente), os contornos de grão freiam o movimento das discordâncias e, por isso, concluímos que, quanto menor o grão, maior é a resistência do material. No entanto, os mecanismos do processo de fluência se desenvolvem nos contornos de grão, movimentos de vazios e de discordâncias. Por isso, os materiais em condições de sofrer fluência terão maior resistência quanto maior for o tamanho do grão.

Atividade 4

Atende ao objetivo 3

O ensaio de fluência consiste em submeter um corpo-de-prova a uma tensão ou carga constante, em temperatura elevada fixa. O gráfico obtido nesse ensaio é do tipo:

- deformação \times temperatura
- tensão \times deformação
- energia absorvida \times temperatura
- tensão \times taxa de deformação
- deformação \times tempo

Resposta comentada

Letra (e). A fluência é um fenômeno de deformação lenta, sob ação de uma carga constante, aplicada durante longo período de tempo. Portanto, o que se quer saber com esse tipo de ensaio é *quanto tempo um material leva para romper* sob a aplicação de uma carga constante, em altas temperaturas.

Conclusão

Os materiais podem falhar mesmo sob tensões inferiores àquelas previstas em ensaios de tração. Isso pode acontecer pela presença de trincas internas ou porque o material está em condições nas quais ocorrem fadiga ou fluência. O conhecimento desses mecanismos permite a seleção correta do material, para uma determinada finalidade, a fim de evitar falhas.



Qual é a altura possível para a Torre de Babel?

A Torre de Babel, como conta a bíblia dos cristãos, foi edificada da Mesopotâmia de mais de 2000 anos a.C. A idéia dos seus construtores era a de erguer uma torre tão alta que se pudesse chegar a Deus.

Bem, ninguém sabe ao certo se a Torre de Babel existiu ou não. A única coisa de que sabemos é que a ciência dos materiais é um dos campos de conhecimento que possibilita especulações, através do método científico, é claro, acerca da viabilidade de sua obra. E é exatamente isso que você poderá conferir acessando o *link* a seguir: <https://www.youtube.com/watch?v=UXpnG5NBa1o>.

Resumo

Após o término desta aula, chegamos a algumas conclusões.

- *Fratura* consiste na separação do material em duas ou mais partes quando submetido a um esforço mecânico.
- *Fratura dúctil* ocorre apenas após extensa deformação plástica e se caracteriza pela propagação lenta de trincas resultantes da nucleação e crescimento de microcavidades.
- *Fratura frágil* ocorre pela propagação rápida de trincas, acompanhada de pouca ou nenhuma deformação plástica.
- *Fadiga* pode ser definida como sendo um processo que causa falha prematura ou dano permanente a um componente que está sujeito a carregamentos repetitivos (cíclicos).
- Podemos definir *três tipos de carregamento*: ciclos de tensões alternadas, ciclos de tensões repetidas, ciclos de tensões variados.
- *O comportamento de um material sob fadiga é descrito por curvas S-N*. Em alguns materiais pode-se observar um limite de fadiga, mas existem materiais em que esse limite de fadiga não pode ser observado.
- Na aplicação real dos materiais em construção de máquinas, muitos são os *fatores que afetam a vida em fadiga*: *Acabamento superficial, tamanho da peça, temperatura, concentração de tensões*.
- *Fluência* é um fenômeno de deformação lenta, sob ação de uma carga constante aplicada durante longo período de tempo a uma temperatura superior a 0,4 vezes Temperatura de fusão em Kelvin.
- *Fatores que afetam a fluência*: Tensão aplicada, temperatura, tamanho de grão, Módulo de elasticidade, temperatura de fusão.

Referências

CALLISTER JR, Willian D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

VAN VLACK, Laurence H. *Princípios de ciência e tecnologia dos materiais*. São Paulo: Blucher, 1970.

